



FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ
A KOLEJOVÝCH VOZIDEL

Energetická náročnost elektropohonu off-road jízdního kola

Energy demands of off-road bicycle electric drive

Vypracoval: Bc. Petr Jehlička
Vedoucí práce: Ing. Morkus Josef, CSc.

diplomová práce
Praha 2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(bude vloženo do výtisku práce)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 20. 12. 2017

Bc. Petr Jehlička

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád vyjádřil své díky za velmi vstřícný přístup a nepřeberné množství cenných rad zejména vedoucímu mé práce Ing. Josefu Morkusovi, CSc. Dále bych chtěl poděkovat mým rodičům a rodině za trpělivost, podporu a příjemné prostředí, ve kterém mohla vzniknout tato práce. V neposlední řadě patří můj vděk také všem mým přátelům a kamarádům za motivaci, kterou mi ať už vědomě či nevědomě poskytují.

ANOTAČNÍ LIST

Autor:	Bc. Petr Jehlička
Název práce:	Energetická náročnost elektropohonu off-road jízdního kola
Title:	Energy demands of off-road bicycle electric drive
Akademický rok:	2017/2018
Ústav:	Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Program:	Dopravní, letadlová a transportní technika
Obor:	Motorová vozidla
Vedoucí práce:	Ing. Morkus Josef, CSc.
Klíčová slova:	parametry kola, parametry trasy, profil trati, součinitel rotačních hmot, jízdní odpory, měřená data, výpočetní program, motor, baterie, řídicí jednotky, snímač, jízdní schéma, spotřeba, dojezd, matlab
Keywords:	parameters of bike, parameters of trajectory, rotational mass factor, altitude of trajectory, riding resistance, measured values, script of calculation, electric motor, controller, sensors, battery, bike diagram of effects, range, matlab
Počet stran:	105
Počet obrázků:	71
Počet grafů:	13
Počet tabulek:	13
Počet příloh:	4

ABSTRAKT

Úvod práce se zaměřuje na obecnou problematiku a výskyt elektromobility v našem životě. Pro lepší orientaci v dalších částech práce a snazší porozumění textu následuje krátký přehled stavu klasických elektrokol, jejich součástí a důležitých ovlivňujících faktorů. Jsou popsány klíčové části elektropohonu jako akumulátory, jednotky, snímače a elektromotory a jejich role v celém systému, jak podporují nebo naopak omezují funkčnost a efektivitu výrobku.

Druhá část rozebírá vlastní elektrokolo, které bylo použito pro všechna měření. Kromě jeho předností popisuje také jeho vývoj a odlišnosti od ostatních běžně dostupných výrobků. Významnou součástí je rozbor a řešení problémů a komplikací při jeho vývoji např. chování a výkon při různých typech namáhání a zatížení při jízdě. Práce popisuje jednotlivé vývojové etapy vzniku stroje od prvních návrhů až po konečný fungující produkt.

Důležitou součástí práce je popis kombinací, které přímo ovlivňují jízdu a tedy podíl vlastní energie spotřebované na trase. Jde především o všechny druhy odporu, které na elektrokolo působí. Jsou rozebírány příčiny, se kterými se tyto odpory chovají v různých situacích a podmínkách různě. Rozebírány jsou také komplikace při jejich správném určení a nastavení.

Výsledná naměřená data jsou dále zpracována a porovnána s daty, která jsou odvozena teoreticky. Jsou popsány konkrétní podmínky a zkušební trať, která sloužila k měření. V této práci je klíčové zaměření na energetickou náročnost a podíl vynaložené energie na konkrétní odpory z jízdy. Dalším důležitým bodem je citlivostní analýza, která porovnává a zkouší další možnosti vývoje dojezdu upravováním měřených veličin.

Výsledkem je jednoduchý software vypovídající okamžitě podle vstupních parametrů na konkrétní otázky dojezdu. Software umožňuje operativně simulovat situace, které mohou během jízdy nastat. Metodu simulace konkrétních situací je možné využít i jako důkaz pro potvrzení určité myšlenky.

ABSTRACT

The beginning of this work trying to solve the complexities of electromobility in our lives. The following subject attempts to show the reader an overview of a classic electric bike with information about each major component to better understand its complexities which are further described. Key components are pointed out in this work and each one has its purpose in the whole system of electromobility, including the battery, controller, sensors and electric motors, as well as why these components are important and how they contribute to the whole mechanism. The following pages also identify their weaknesses and strengths.

The second part of this work is based on our e-bike, which was used as a form of measurement. We also demonstrate the strong and weak aspects of this bike, and how its development is so different from a normal e-bike. This work also outlines the issues of material stress and the stress points of the frame while the bike is running. There is also a timeline during which it is possible to compare the first release of the e-bike with the latest one, the difference between the two and its step-by-step development from the first drawing up to a fully functional vehicle.

For some results it is important to indicate the physical laws and mathematical principles. Everything is based on energy consumption which is generated while the bike is being ridden. During a ride there are resistances affecting the amount of energy the motor expends. There is also an analysis which tells the reader what is happening as the situation changes. The analysis indicates how some coefficients change due to weather fluctuations or a different riding style. Why they change and why it is quite challenging to achieve the correct setting. There are tests that can be done to determine the range of a single charge.

Final measured data is processed and compared to each other with theoretical data which is based on measured coefficients. There is an overview of the complete track where the rider goes and the energy demands for each area of resistance on the track. The next subject is the analysis of sensitivity. This means the ratio in which the energy demands increase or decrease depending on the configuration of the track, such as resistance due to variations on the type of surface, the weight, size and style of the rider and so on. This analysis is ideal for the creation of new tracks, the new development of battery packs or the complete vehicle.

The result of this work is a program which can easily set the range for one single charge. The program's functionality is based on measured data and the results that are based on them. This program can also provide results on any random and unknown track. It will also enable the user to simulate a riding experience, anticipate problems and resolve them before they occur.

OBSAH

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	3
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
ANOTAČNÍ LIST	7
ABSTRAKT.....	8
OBSAH.....	10
1. ÚVOD	12
2. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	15
3. STÁVAJÍCÍ PŘEHLED	16
3.1 Historie elektrokol.....	16
3.2 Současný stav	18
3.3 Funkční celky	19
3.3.1 Řídící jednotky BLDC.....	19
3.3.2 Baterie	22
3.3.3 Snímače a senzory.....	25
3.3.3 Elektromotory	31
4. PŘEDSTAVENÍ KOLA BOXXBIKE ADVENTURE	35
4.1 Vzhled a stavba	36
4.2 Specifikace, parametry a popis	37
4.3 Vývoj kola	41
5. JÍZDNÍ ODPORY A ZTRÁTY.....	46
5.1 Schéma kola	46
5.2 Jízdní odpory	47
5.2.1 Odpor valení.....	47
5.2.2 Odpor stoupání	58
5.2.3 Odpor akcelerace	59
5.2.4 Odpor vzduchu	61
5.3 Deformace, ztráty a prokluz kola	66
6. ZPRACOVANÁ DATA.....	68
6.1 Charakteristická trasa.....	68
6.2 Stanovování energetických ztrát.....	72
6.3 Stanovování součinitele rotačních hmot.....	74
6.4 Naměřené hodnoty z jízdy	77

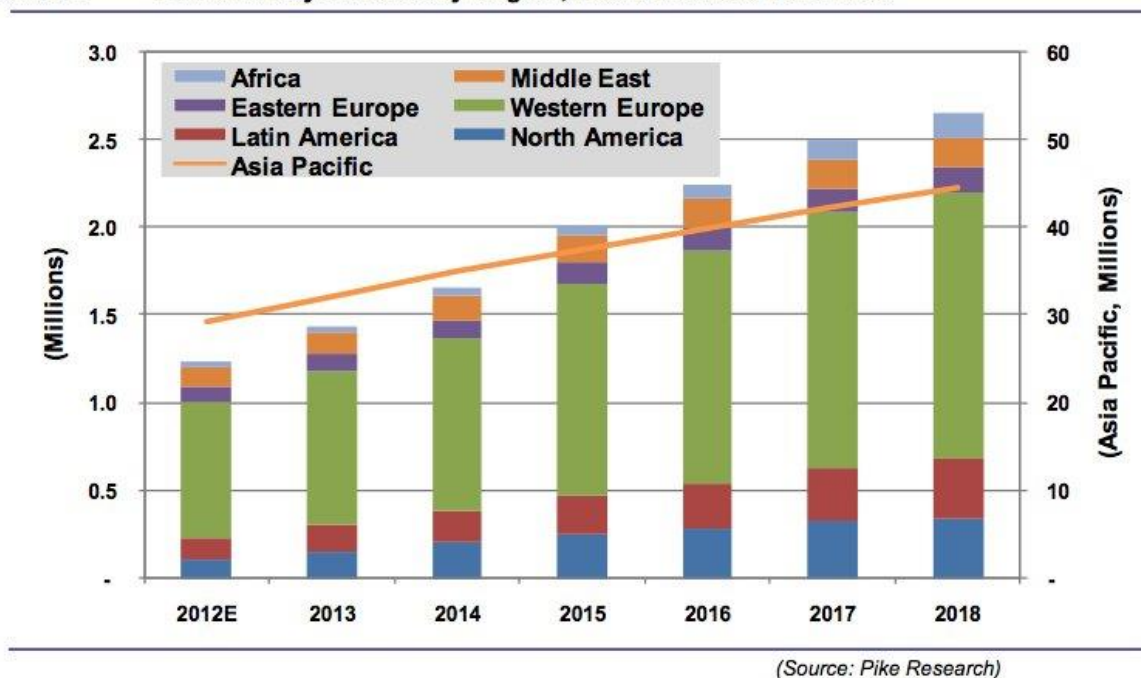
6.5 Vypočtené hodnoty v PC – porovnání s kapitolou 6.4	81
6.6 Rekapitulace výsledků	82
7. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA.....	84
8. PROGRAM A JEHO POPIS	88
8.1 Obecný příklad	92
8.2 Rozšiřování programu	94
8.3 Využitelnost.....	95
9. ZÁVĚR.....	96
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	97
SEZNAM PŘÍLOH	99
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	100
SEZNAM GRAFŮ	103
SEZNAM TABULEK.....	103
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	104

1. ÚVOD

Proč jsem založil společnost Boxxbike na vývoj, výrobu a provozování speciálních elektrokol? Vedlo mě k tomu více důvodů. Chtěl jsem ukázat, v čem jsou elektropohon a elektromobilita výjimečné a pro jakou kategorii jsou smysluplnější a příjemnější, než klasické motorky nebo osobní automobily. Aktuálně moje společnost už elektrokola vyrábí a zároveň provozuje jejich půjčovnu. Mám tak možnost se přesvědčit, že je hodně lidí, kteří mají zájem si vyzkoušet něco jiného, než je běžně na trhu.

V uplynulých několika letech trh s běžnými elektroky výrazně akceleroval. Za rychlým rozvojem produktů tohoto typu, které během několika málo let zaplavily trh, je několik faktorů. Zmíním se o třech hlavních:

Chart 1.2 **Electric Bicycle Sales by Region, World Markets: 2012-2018**



Graf 1: Nárůst prodeje elektrokol ve světě od roku (2012) do roku (2018) [1]

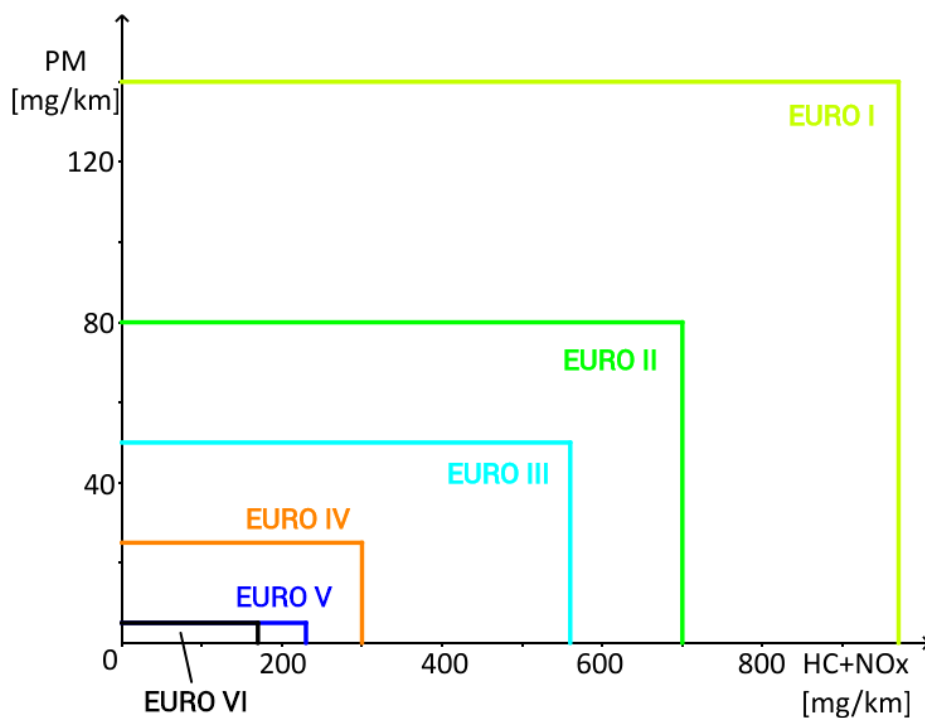
1. Elektrocolo nepodléhá podle zákona homologačnímu procesu.
2. Široká síť distribučních kanálů a zavedených prodejen spolu s masovým rozvojem a rostoucí oblíbeností e-shopů výrazně usnadňují novým zajímavým produktům rychlé proniknutí na trh.
3. Snižování váhy díky vývoji nových materiálů.

Vývoj ukazuje, že váha hraje v tomto segmentu podstatnou roli. V oblasti, do které se nově Boxxbike posouvá, vidím vliv hmotnosti jako zásadní. Vývoj a technologie dosáhly za krátkou dobu u klasických elektrokol maxima a vlivem legislativních nařízení jsou limitující. Nová oblast, na kterou se Boxxbike soustřeďuje, se týká lehkých elektrovozidel přesahujících výkon **250 W** a **25 km/h** typu pedelec. Jde především o malé mopedy a motocykly. Vidím zde příležitosti i pro menší společnosti, které jsou pružnější a schopné operativně reagovat na měnící se potřeby trhu a tedy i na tyto specializované typy elektrovozidel. Mluvím o segmentu, který kombinuje prvky klasického kola a

motorky. Klíčovým prvkem, který kombinace kola a motorky umožňuje, je vývoj elektromotoru, který nahradí stejně výkonný spalovací motor. Spalovací motory jsou v porovnání s elektromotorem srovnatelného výkonu jednak obecně výrazně větší, těžší a zástavbově robustnější a jednak mnohem složitější zařízení než elektromotor. V současnosti Boxxbike pracuje na novém typu mopedu, určenému pro městský i mimo městský provoz a na jeho homologačním procesu.

V této práci se budu věnovat prvnímu modelu, který je určen pro jízdu v terénu. Jedná se o hybrid mezi klasickým jízdním kolem a motocyklem. Během vývoje prvního modelu pro mě byla stěžejní otázka dojezdu. Bude výkon baterie dostatečný při jízdě v terénu? Jak se bude dojezd lišit při jízdě na silnici? Jak se na dojezdu odrazí rozdíly v hmotnosti jezdce? Za tímto účelem vznikla tato práce a program, který si klade za cíl dát odpovědi na uvedené otázky, tzn. popsat a objasnit vliv výkonu baterií na dojezd při různé zátěži a rozdílných terénních a dalších podmínkách. Výsledkem by měla být možnost simulace různých modelových situací a pomoc při správném určení kombinace elektrokomponent pro různé zákazníky a jejich potřeby a požadavky.

Důležitým prvkem, který společnost Boxxbike vedl k zaměření se na elektropohon, jsou emise. Stále se zpřísňující normy a požadavky vlád, povedou k tvrdším a striktnějším pravidlům. Už příští rok nebude možné jet klasickým automobilem se spalovacím motorem v centru Londýna a je zřejmé, že další města budou příkladem Londýna následovat. Orientace na bezemisní technologii je pro Boxxbike nespornou výhodou. Nehledě na množství norem a předpisů pro spalovací motory a jejich emise, kterými jsme se na schůzce kvůli homologaci vůbec nemuseli zabývat. Toto téma nabývá na důležitosti, je stále častěji diskutováno a rozebíráno a ze situace budou profitovat právě společnosti založené na elektropohonech a elektromobilitě. Je velmi pravděpodobné, že stejně jako klasické automobily, budou i jednostopá vozidla se spalovacími motory podléhat splnění emisních norem. Na **grafu 2** je vidět vývoj norem EURO. Je jen otázkou času, kdy se začnou normy vztahovat i na jednostopá vozidla se spalovacími motory.



Graf 2: Omezení vybraných exhalací motorů osobních automobilů evropskými normami EURO I (1992) až EURO VI (2014) [2]

Vlivem tohoto vývoje EURO norem a nařízení vlád se budou otvírat nové příležitosti na poli elektromobility. V dnešní době můžeme vidět zatím jen velmi málo produktů čistě na elektropohon, i když myšlenka elektrokola není nová. První známý patent elektrokola si připisuje Hosea W. Libbey z amerického Bostonu z roku **1897**. Bohužel technologie a technická nedospělost tuto myšlenku zastavily. Je v dnešní době tento segment na takové úrovni, aby byl aplikován do běžného života lidí? Většina výrobců si zatím jen mapuje trh.

Pohon na klasická fosilní paliva bude pravděpodobně ještě dlouho první v žebříčku. Elektropohon ale nabízí další zajímavou alternativu, která bude utvářet svět jinak, než jej dnes známe. Svou roli v rychlosti prosazování této alternativy hraje také mediální zviditelňování a vývoj nových produktů, ale i otevřenost lidí pro tato odvětví.

V první fázi této práce začnu popisem klíčových částí elektrokol. Vysvětlím jejich význam, k čemu slouží a na jakých fyzikálních a mechanických principech fungují. Poté bude následovat popis mého elektrokola, se kterým se měření provádělo, jeho specifikace a parametry, celkový vzhled kola a jeho vývoj. V kapitole s jízdními odpory ukážu, co nás provázelo a brzdilo při zkušebních jízdách. Popíšu podíl odporů na finálních výsledcích a problémy, které jsem řešil. Poté budou zobrazena a vysvětlena zpracovaná data, problémy a chyby s odměřováním a důvody výskytu těchto chyb. Zajímavým navazujícím pokračováním bude citlivostní analýza, která bude porovnávat dojezdy stejného elektrokola v různých situacích a podmínkách. Poslední kapitola představí program, který je schopen zobrazovat dojezd při zadání několika hlavních hodnot.

2. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem práce je navrhnout funkční program pro výpočet reálného dojezdu ze vstupních parametrů o trase, kole nebo motocyklu a o konstantách, které definují všechny jízdní odpory. Tento program by měl zjednodušit budoucí návrhy a koncepty společnosti Boxxbike a zpřesnit tak i informace pro další kroky jejího vývoje. Dále by měl sloužit ke zmapování nových jízdních tras pro půjčovnu, kterou společnost provozuje. Zpracované trasy, podle kterých se lidé řídí, by měly předpovědět problémy nízké kapacity baterie pro zvolenou trasu a předejít jim. Předpokládá se, že tím tyto problémy eliminujeme na minimum, protože program na možné potíže bude upozorňovat již při návrhu. Nebude nutné tyto trasy přímo projíždět a tím se zrychlí i celý proces zmapování oblasti. Postupem času by do těchto map měla přibývat místa, na kterých bude možné kolo dobít a tím se prodlouží celková doba jízdy.

V dnešní době je na trhu velké množství různých typů baterií a článků, které se hodí pro různé typy operací. Je tedy důležité najít vhodný balancovací bod mezi několika charakterizujícími vlastnostmi. Tyto vlastnosti a poměr cena/výkon/váha/dojezd povedou v budoucnu k značným finančním úsporám, protože baterie je nejdražší částí celého stroje.

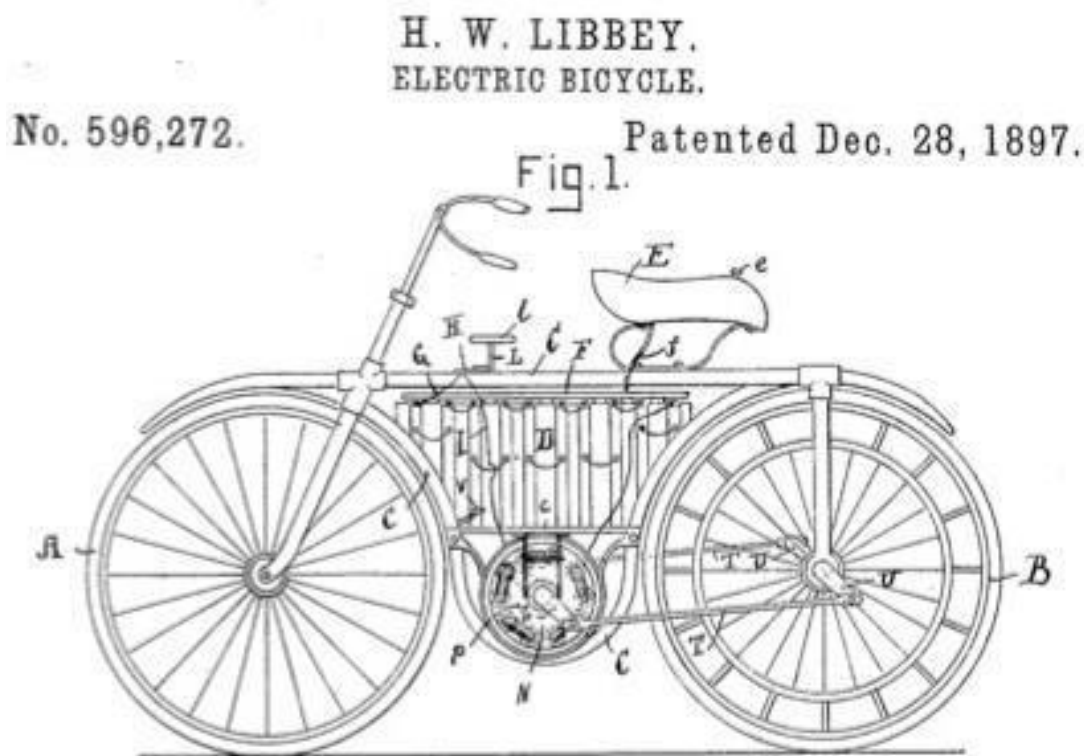
3. STÁVAJÍCÍ PŘEHLED

Následující kapitola přináší popis obecného vývoje klasických elektrokol od historie až do dnešní doby. Bude zde také rozebráno elektrokolo jako celek, jednotlivé funkční celky a jejich vývoj.

3.1 Historie elektrokol

První zmínky o běžném jízdním kole se datují okolo roku **1817** od vynálezce Karl Draise z městečka Karlsruhe. Kolo, jak je známo v dnešní době, tedy dva ráfky o stejném průměru s pohonem pedály, bylo sestrojeno **1862** Pierrem Lallementem ve Francii. Poté John Dunlop vynalezl pneumatiky a řetězový pohon pro bezpečnou jízdu.

V devadesátých letech 19. století se objevují nové patentové přihlášky kol, které k pohonu využívají i elektrickou energii a elektromotor. V roce **1897** **Hosea W. Libbey** z amerického Bostonu sestrojil elektrické kolo (U.S. Patent **596,272**) poháněné „dvojitým elektrickým motorem“, který byl umístěn ve středu osy klikové hřídele. Tento model byl v roce **1990** znovu sestrojen a imitován, jako kolo Lafree spol. Giant.



Obr. 1: První elektrické kolo H.W.Libbey z roku 1897 [3]

U nás první návrhy přicházejí až v první polovině **20. století**. Jedním z prvních, kdo se zabýval elektrickým kolem, v té době nazývaným „elektrocyklem“, byl Ing.H.Fügner a to v roce **1938**. V roce **1944** dokončil svůj prototyp, kde využíval vylepšené a upravené dynamo Sentuilla o výkonu **150 W** při napětí **24 V**. Kolo dosahovalo úctyhodných parametrů. Rychlost po rovině byla **14 km/h** a s odbuzením až **36 km/h**. Olověné a v tu dobu jediné dostupné baterie měly kapacitu **75 Ah** a dojezd po rovině při **14 km/h** byl úctyhodných **70 km**. Váha stroje bez jezdce se vyšplhala spolu s bateriemi na **140 kg**. Je

dobré sledovat, jak **70 let** poté se váha pohybuje o **85 %** níže při stejných dojezdech a vyšším výkonu kola.

Opravdový rozvoj ale teprve začínal. Důležitým krokem byl pokrok v technologii, který přinesl možnost ovládat točivý moment elektromotoru. Tento poznatek byl objeven koncem **90. let 20. století**. První typy moderních elektrokol se objevují na trhu okolo **1992** a po šesti letech, tedy v roce **1998** už je možné na trhu najít **49** různých typů elektrokol, přičemž jejich produkce rostla o **8 %** ročně. Toto období je nazýváno obrozením elektrických kol, které dále vede k výkonnějším systémům, lehčím a menším bateriím.

Zhruba ještě před **15 lety** měla všechna elekrokola těžké a velké olověné baterie. V dnešní době se běžně používají baterie s hlavní složkou lithia a nebo klasické galvanické články **NiMH**. Výhoda těchto baterií je, že netrpí paměťovým efektem jako klasické baterie a jsou schopné poskytnout dostatek energie až na **100 km** i více při zachování rozumné váhy. [3]



Obr. 2: Fotografie p. Milana Fügnera při jízdě na jednom z prvních elektrokol [3]

3.2 Současný stav

V dnešní době je možné na trhu najít obrovské množství produktů na baterie. Od ručního nářadí, elektrokol, koloběžek, skateboardů až po elektrická surfovací prkna. Co se týká elektrokol, existuje množství druhů a typů. Vzhled a ergonomie se odvíjejí od vznikajících komponent, popř. se výrobci kol přizpůsobují komponentám, které jsou běžně na trhu. V dnešní době je kladen veliký důraz na zapracování dalších funkčních celků (baterie, motor atd.) do těla rámu se zachováním požadované pevnosti při různém typu namáhání. Kolo tak vypadá esteticky mnohem lépe a zásadně se neliší od klasického běžného kola.



Obr. 3: Kolo haibike enduro určené ho terénu se zapracovanou baterií a motorem uprostřed rámu kola [4]

3.3 Funkční celky

Mezi funkční celky je možné si zařadit všechny následující podkategorie tohoto tématu. Funkční celky jsou části, bez kterých by elektrokola a obecně elektropohony nemohly správně fungovat anebo by měly pouze omezené možnosti funkcí. Je tedy možné říci, že tyto části jsou majoritní a nejdůležitější. Obecnou skladbu elektrokola vidíme na obrázku pod textem.



Obr. 4: Obrázek rozkladu klasického elektrokola na jeho jednotlivé funkční celky [5]

- 1.regulátor – zařízení sloužící k ovládání a regulování napětí a proudu do motoru resp. řídí motor; 2.bezkartáčový motor – elektromotor používající ke komutaci regulátor; 3.PAS – neboli pedal assist sensor je zařízení snímající pohyb nohou a informující regulátor; 4.baterie – běžná baterie Li-ion posvažovaná z článku nejčastěji 18650; 5.display – display obecně slouží k informovanosti jezdce o stavech kola případně nastavení motoru;

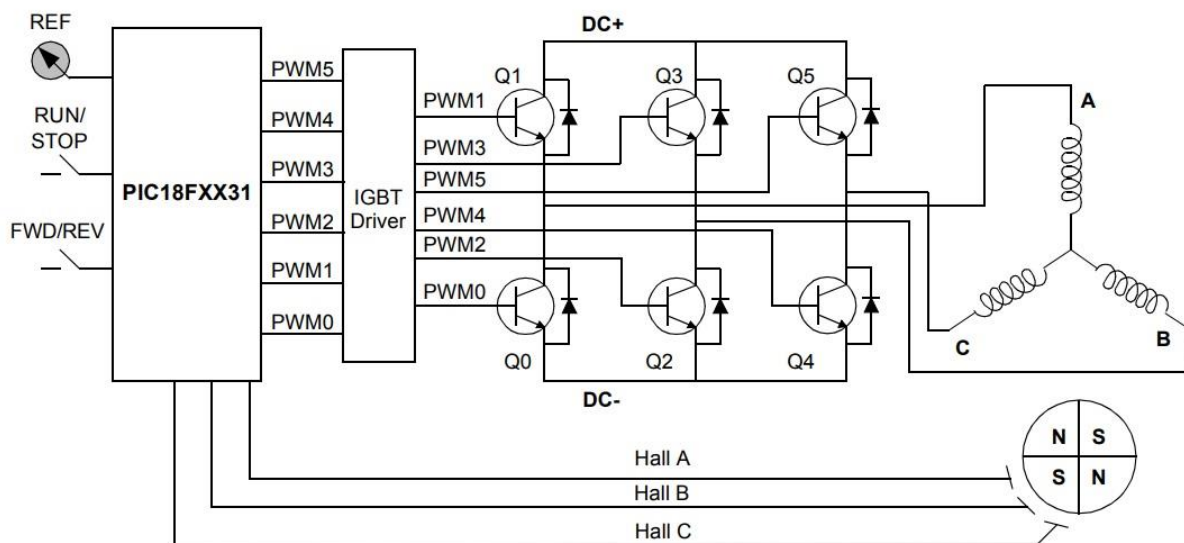
3.3.1 Řídící jednotky BLDC

Řídící jednotky jsou nejdůležitější částí celého elektropohonu. Obecně mají na starost celý chod a všechny další doplňky. Přes jednotku, neboli také regulátor, se dějí veškeré operace, které charakterizují výsledné chování nebo reagování celého systému.

Platí, že BLDC motory potřebují elektronickou komutaci, tedy tzv. kontrolér, který řídí komutaci místo kartáčů, jak je to známo u klasického stejnosměrného motoru. Kontrolér je rozdělen na výkonovou část a výpočetní část. Výkonová část přenáší potřebné napětí a proudy přímo na jednotlivá vinutí motoru v přesně dané sekvenci. Tuto sekvenci řídí právě výpočetní část kontroléru.

Výpočetní část jednotky má za úkol reagovat na řídicí signály v závislosti na senzorové zpětné vazbě. Nejběžnější řešení zpětnovazebního senzoru je **Hallův snímač**. Obecně se do motoru vkládají **3 Hallovy snímače** pootočené vzájemně od sebe o **120°** elektrických. Signály ze snímačů mají dvojí účel. Prvním účelem k řešení je umožnění vlastní komutace a tedy umožnění rotace motoru. Tato komutace

je zajištěná právě přes správné propojení polarity napájení se správnou fází motoru. Druhým účelem je regulace výkonu, která se řeší pomocí pulsně šířkové modulace tzv. PWM. [6]

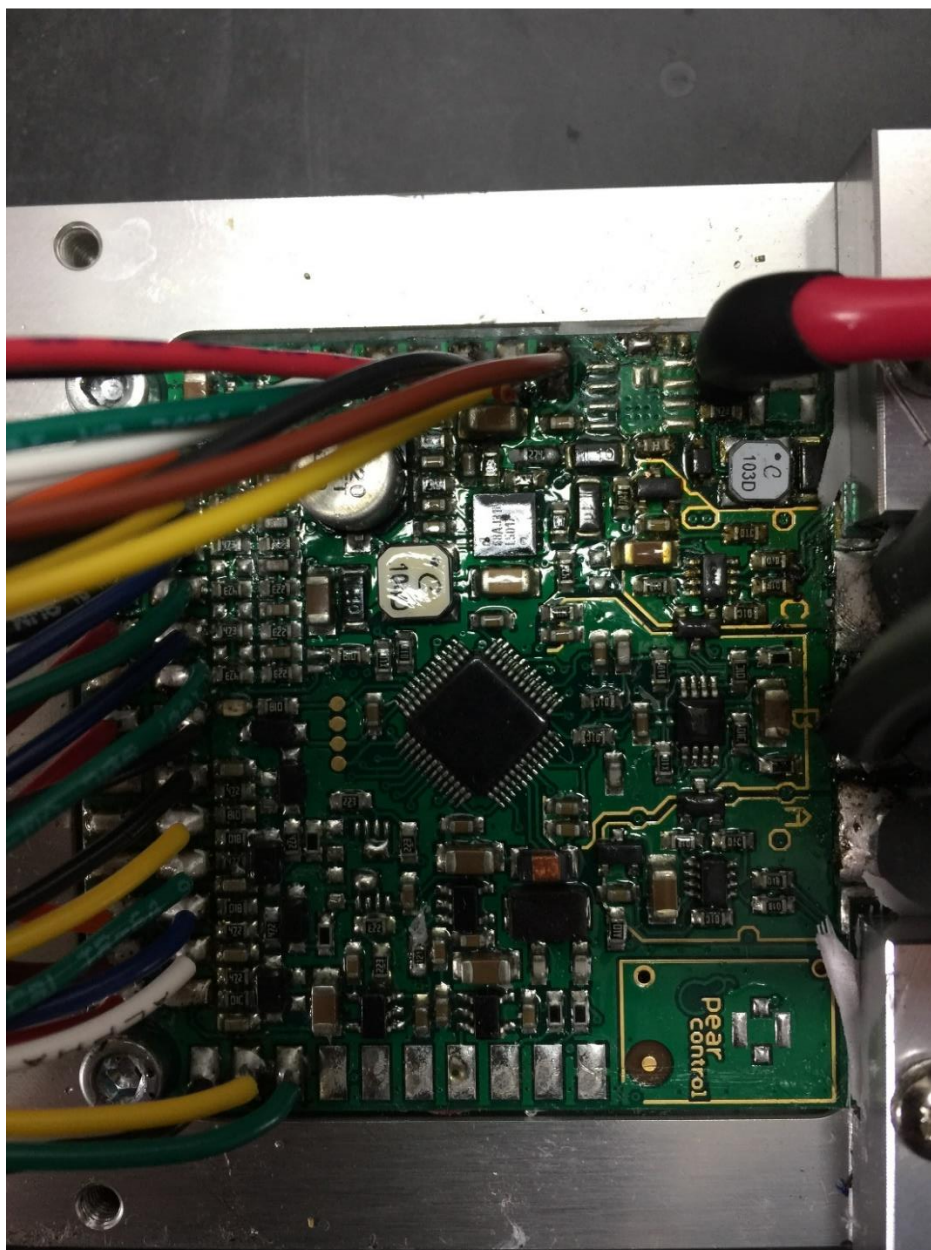


Obr. 5: Schéma kontroléru motoru [6]

Na pravé straně je možné vidět motor zapojený do hvězdy. Od motoru vedou Hallovy snímače Hall A,B,C pootočený o 120° informující mikroprocesor o pozici. Přes PWM se řídí výkon a spínání tranzistorů. Poté je vidět série IGBT tranzistorů, tedy tranzistorů využívajících výhod unipolární i bipolární tranzistoru. IGBT tranzistory jsou výhodné pro vysoké napětí a vysoké výkony. Nejčastěji bývají tranzistory zapojeny do můstku se vzájemnou zpětnou vazbou. Důležitou vlastností je proudová zatížitelnost, která je důležitá u výkonových tranzistorů. Ztráty výkonových tranzistorů jsou závislé na nízkém tepelném odporu a napěťovém přetížení. Snaha je spínat tranzistor co nejrychleji. Musí se tedy nabíjet vstupní kapacita na bráně neboli gate tranzistoru pomocí vyššího proudu. Toto je ale téměř nemožné docílit, proto se využívá předřazeného IGBT tranzistoru, který řídí řízení ostatních pomocí pomocného obvodu. Přes logické úrovně spíná výkonové tranzistory a tím je schopný poté kontrolér jako celek konat svoji práci a řídit motor.

K samotné výpočetní části se používá mikroprocesor, který řídí otevírání a zavírání tranzistorů a ostatních částí kontroléru. Celý systém je daleko složitější a komplexnější a popisovat si jednotlivé principy a důsledky by vystačilo na samostatnou diplomovou práci, proto pouze okrajově. Nejedná se jen o tranzistory, které je třeba řídit, ale jedná se o celek jako systém. Přednabíjení kondenzátorů, řízení signálů z ovládacích periférií a další podobné typy operací. Například u elektrokol můžeme perifériemi označit části jako je plyn, senzor kadence nebo momentový snímač šlapání, rekuperační brzda, teplota motoru, jednotky a nebo i baterie. Tento procesor řídí i samotnou komunikaci mezi jednotlivými zařízeními, která může být realizovaná po **CAN** sběrnici, případně sériovou dvou vodičovou linkou typu **UART**, která pomocí dvou vodičů zprostředkovává přenos zpráv představujících **TX a RX** neboli příjem a odesílání dat. Je velké množství veličin, které je možné řídit, číst, sbírat a vyhodnocovat. Pro jednodušší operace se používají **8** bitové procesory. Pro složitější řízení, například řízení vektorové, se používají **32** bitové procesory. To je i případ kola Adventure. Motor na kole je řízen složitějším vektorovým řízením ve zkratce FOC. V anglické literatuře je označováno jako Field Oriented Control. Jedná se o složitější strategii, která se stará o podobu řídicích signálů v každém možném časovém okamžiku za časový interval jedné komutace. Ke komutaci dochází nepřetržitě v každém časovém okamžiku daném vzorkovací frekvencí. Tato metoda je vhodnější pro stejnosměrné motory s permanentními magnety. Nejčastěji se toto řešení používá pro sinusovou komutaci motoru, se kterou pracuje s nejvyšší efektivitou a účinností. Pro lichoběžníkový proces komutace se hodí lépe jiný a lehčí druh řízení. Není však vyloučeno, že vektorové řízení nebude pracovat i pro lichoběžníkovou komutaci.

Může být ovlivněna plynulost chodu motoru. Může také dojít ke zvlnění momentové křivky. Je důležité dodržet základní princip při navrhování elektropohonu. Není vhodné kombinovat části, které nejsou určené k tomu, aby spolu správně pracovaly. Tedy klasický BLDC motor s lichoběžníkovým průběhem komutace není vhodné kombinovat s řídicí jednotkou určenou pro vektorové řízení BLDC motoru se sinusovou komutací. Vektorové řízení je perfektní právě z důvodu, že řízení motoru probíhá v reálném čase, proto jsou eliminována téměř veškerá zvlnění a zakmitání v momentové křivce. Vektorové řízení velmi rychle a plynule reaguje na náhlé změny zatížení, čímž přináší do systému vyšší efektivitu a lepší odezvu pro uživatele. Navíc lze jej použít od nízkých otáček. Nevýhodou je náročnost na výpočetní hardware a jeho kvalitu. [6]



Obr. 6: Výpočetní část kontroléru použitého na kolech Boxxbike – uprostřed 32bit procesor

Jako shrnutí je nutné říci pár podstatných informací. Řízení motoru a celého běhu systému je závislé na centrálním mozku, tedy na řídicí jednotce. Obecně je možné se setkat s jednotkami sofistikovanějšími s velice komplexním a složitým nastavením, ale je možné i pracovat se zařízeními,

které slouží pro splnění jednoduchých funkcí, které bývají pevně nastaveny a není možné je nějak zásadně technicky upravovat. Je nutné však pamatovat na to, že kontrolér nezajišťuje jen nízkonapěťové a nízkoproudové výpočetní řízení, ale musí zvládat i siloproudové stavy a přepětové stavy. Z tohoto pohledu se tedy jedná o velmi komplexní zařízení. Špatný návrh nebo typ může vést ke zničení nebo dokonce i samovznícení přístroje vlivem zkratu nebo chybového stavu v jádru napsaného firmwaru.

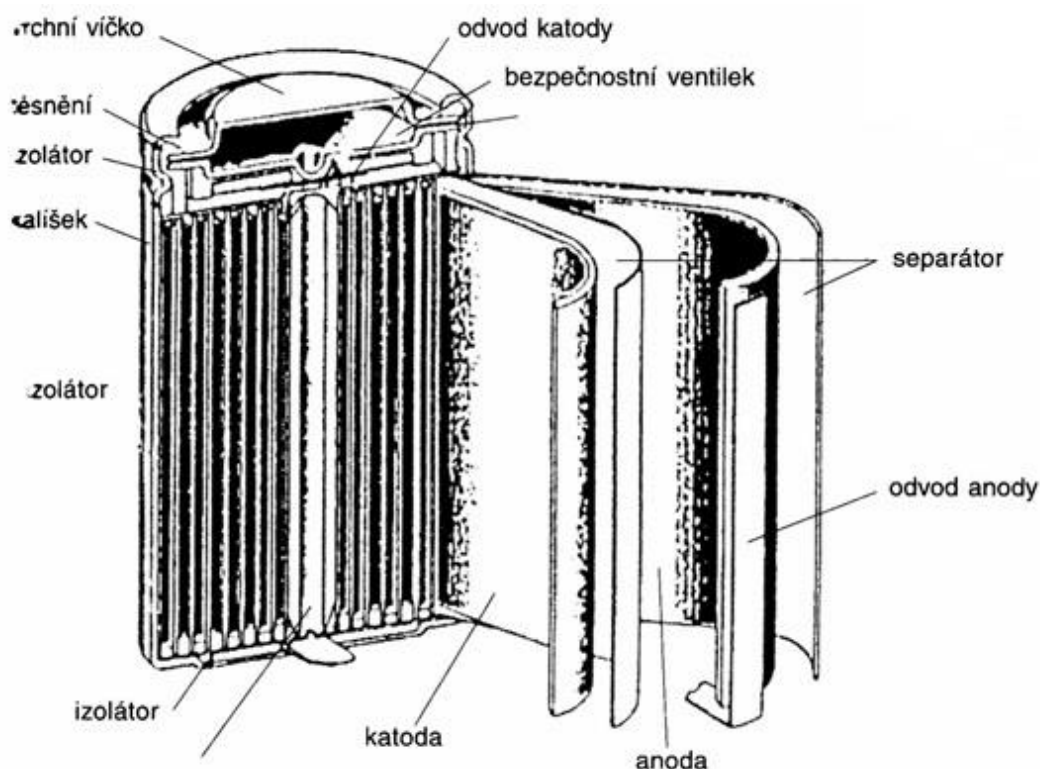
3.3.2 Baterie

O baterii je možné zjednodušeně říci, že se jedná o zásobárnu energie pro celý elektropohon. Pro představu rozdílu mezi systémem klasického spalovacího motoru bych baterii přirovnal k palivové nádrži. V dnešní době se jedná o velmi diskutované téma, které je spojeno se mnoha prognózami. Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně neprobádanou oblast, setkáváme se i s ne zcela korektními marketingovými triky. Je ale známo pár faktů. Baterie prodělaly svůj vývoj a stále se na něm pracuje a stále se do něj investují nemalé peníze, protože bude platit, že ten, komu se podaří vyvinout nejlepší typ článku s nejlepším poměrem cena/výkon/váha, bude zaujímat první místo na trhu. Jak už bylo zmiňováno v této práci, v dnešní době je na baterie téměř všechno. Od zahradních sekaček, ručního nářadí, elektrokol a další spousty kategorií, které k pohonu používají právě energii z akumulátorů. Posun dopředu podle minulých prognóz zřejmě už nebude tak významný, ale při srovnání úrovně a možností před **20-30** lety a dnes, je posun naprosto zásadní. Nabízím pohled na nejpoužívanější článek dnešní doby **obr.7**. Tyto články se pro dosažení požadovaných napětí a kapacit bodově svařují na svých čelech. Svařují se do větších celků a soustav a tyto celky se nazývají bateriové „paky“. Nejčastěji se staví do zapojení **36 V** a **48 V** nominálního napětí. Při nominálním napětí jednotlivě tyto články dosahují hodnoty **3,6 V**. Jsou i jiné typy článků, které dosahují rozdílných napětí, ale rozdíly nejsou významné. Mezi nejpoužívanější typy v dnešní době patří **články Li-ion , Lifepo4 a články Li-po** . Bližší informace o těch typech najdete dále v textu.



Obr. 7: Článek 18650 od společnosti Samsung typ 26F [7]

Lithium iontové baterie je druh nabíjecích baterií, v nichž kladná elektroda je z materiálu, který obsahuje ionty lithia a záporná elektroda je vyrobena z porézního typu uhlíku. Při vybíjení dochází k tomu, že proud protéká od kladně nabitě anody k záporné katodě, jak je to běžné známo u všech typů baterií. Proces, který se odehrává uvnitř článku, představuje pohyb kladných iontů lithia, které se pohybují přes elektrolyt a oddělovací membránu do uhlíkové katody. Lithiové ionty se zakořeňují hluboko v materiálu katody v procesu známém jako interkalace. Při nabíjení proud prochází v opačném směru než při běžném provozu, kladný pól z nabíjecího obvodu musí být napojen na katodu baterie a anoda musí být připojena k záporné svorce ve vnějším obvodu. Při nabíjení tedy dochází k interním změnám, které vedou ke zvrtnému procesu. Lithiové ionty z katody jsou uvolňovány a za pomoci elektrolytu se dostávají přes membránu zpět na anodu. [8]



Obr. 8: Řez typickým Li-ion článkem [9]

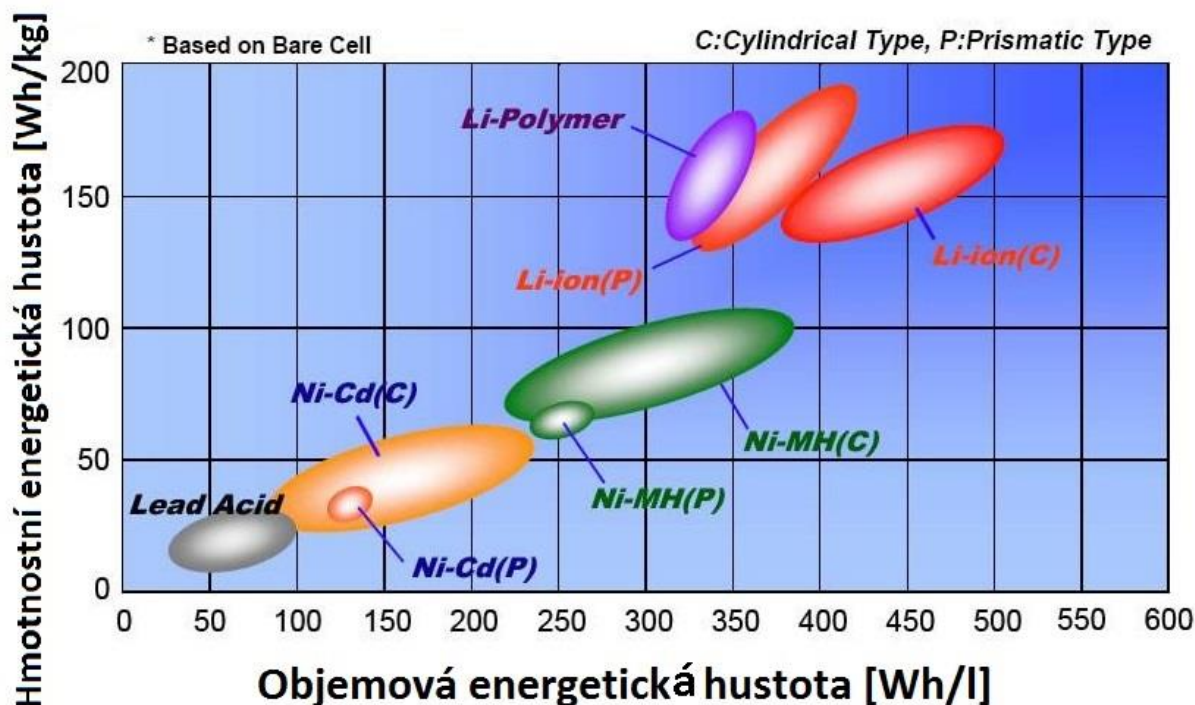
Lithiové baterie jsou charakteristické svou vysokou energetickou koncentrací (zhruba **150-200 Wh/kg**). To je hlavní důvod, proč jsou tak atraktivní a často používanou komoditou. V porovnání s olověným akumulátorem, který dosahuje hodnoty (**30-40 Wh/kg**), nebo klasickou galvanickou baterií, která je na tom o něco lépe (**40-80 Wh/kg**), jde o několika násobně vyšší výkon. Další velmi významnou výhodou lithiových baterií je velmi nízké samočinné vybíjení (**2 % až 8 %** měsíčně), což se nedá říct o typech porovnávaných výše v textu. Poslední a nejdůležitější vlastností, kterou se liší od své technologicky starší konkurence, je životnost. Lithiové baterie jsou schopné pracovat **500-2000** nabíjecích cyklů. Je dáno, že za životnost baterie se bere hodnota, kdy článek dosáhne **80 %** své původní kapacity. Baterie stále funguje, ale její kapacita z původních **100 %** klesne na **80 %**. V této fázi baterie splnila účel, pro který byla určena. Dnes se vymýšlejí možnosti, co dělat se stále fungujícími články, které pouze dosáhly této hranice, ale stále dobře fungují a mohou dál pracovat. Většina výrobců baterie recykluje a využívá tyto články dále například pro stavbu

domácích elektráren v kombinaci s fotovoltaickými panely, případně do ručního nářadí. Za jeden nabíjecí cyklus se bere stav, kdy dojde k úplnému vybití baterie a úplnému nabití baterie. [10] [11]

Čím se odlišují tři nepoužívanější chemie lithiových článků? Základní rozdělení baterií **li-ion**, **lifepo4** a **li-po** je hlavně v oblasti použití a charakteristických vlastností jednotlivých typů. Jedná se o výběr v dnešní době nejvíce používaných. Určitě je možné nalézt i výjimky v níže zmiňovaných parametrech, ale opravdu se jedná o speciální úpravy nebo výjimečnou chemii složení článku. Tabulka níže představuje odlišnosti variant, které se na trhu vyskytují nejčastěji a běžně se s nimi setkáváme. Hodnocení probíhá jako ve škole, tj. *výborná* je stupeň pro nejlepší hodnocení.

X	Li-ion	Lifepo4	Li-po
Nominální napětí	3,6 V	3,2 V	3,7 V
Maximální napětí	4,2 V	3,6 V	4,2 V
Maximální vybíjecí proud	1-20 A na článek	1-10 A	1-50 A
Maximální nabíjecí proud	1-4 A	1-3 A	1-15 A
Životnost (70%)	250-750 cyklů	1500-3000 cyklů	100-300 cyklů
Stálost a náchylnost	velmi dobrá	výborná	dostatečná
Hořlavost	dobrá	dostatečná	výborná
Nejčastější tvar	18650	prismatický obal	Sáček „pouch“
Účel použití	aku nářadí, kola, auta	auta, fotovoltaika	drony, RC modely
Váha/energie/rozměr	výborná	dobrá	velmi dobrá

Tab. 1: Srovnání třech základních typů lithiových baterií [12] [13] [14]



Graf 3: Rozdělení jednotlivých typů baterií podle výkonu a hustoty energie [15]

Čisté lithium je stejně jako sodík velmi reaktivní. Oba alkalické kovy energicky reagují s vodou ve formě hydroxidu a uvolňují vodík. To je také důvod, proč se v bateriích tohoto typu používají bezvodé elektrolyty. Mezi základní funkční složky řadíme u lithium-iontové baterie anodu, katodu a elektrolyt, který se liší hlavně použitým materiálem. Nejvíc používaný materiál pro anodu je grafit a pro katodu je obvyklé použití vrstvené struktury oxidu, jako například oxid lithia a nebo kobaltu LiCoO_2 , který je také znám pod názvem kobaltitan lithný. Pro elektrodové materiály se používají chemické sloučeniny, které mají svoji strukturu založenou na polyanionu neboli také lithium železnatý fosfát. Často se využívá materiálů se spinelovou strukturou jako je LiMn_2O_4 neboli lithium oxid magničitý. V závislosti na volbě těchto třech hlavních složek se významně mění a tvaruje celkový charakter výsledného článku. Tato volba má vliv na napětí, kapacitu, životnost a také bezpečnost lithium-iontových baterií. V nedávné době začaly továrny vyrábět nové typy baterií **21700**. Tento typ vznikl za jediným účelem, kterým je poskytnutí většího prostoru pro další nový vývoj. Typ **18650** dosáhl svého limitu, jak je možné vidět při pohledu o **4-5 let** zpět, kdy se baterie příliš nelišily od špičky v dnešní době.

Výhody Li-ion baterií:

- Může být vyrobena v různých tvarech
- Velmi vysoká hustota energie oproti technologicky starším typům
- Díky vysoké kapacitě dosahuje ve výsledku příznivého poměru objem/hmotnost
- Nemá paměťový efekt
- Velmi nízké samovybíjení
- Vysoké nominální napětí
- Životnost okolo **250-750** nabíjecích cyklů v závislosti na používání a nabíjení [12]
- Nevyžaduje žádnou údržbu z hlediska uživatele

Nevýhody Li-ion baterií:

- Baterie trpí stárnutím, neboli ztrácí svoji kapacitu nezávisle na to, jestli ji někdo používá nebo ne. Baterie začíná stárnout od okamžiku výroby článku. Stárnutí se zrychluje s vyšší teplotou, vyšším stavem nabití a také při použití vyšších nabíjecích a vybíjecích proudů
- Baterii více než přebíjení vadí silné podbití, kdy může dojít k okamžitému zničení a baterii již nelze nabít
- Nebezpečí výbuchu nebo vznícení
- Baterie, která je vybitá delší dobu, se může sama od sebe zničit
- Vyšší cena
- Kapacita klesá s počtem nabíjecích cyklů

3.3.3 Snímače a senzory

Hallova sonda

Snímače a senzory jsou zařízení, které dělají jízdu a ovládání elektropohonu mnohem pohodlnější a intuitivnější. Je možné je rozdělit na řídicí a ochranné. V některých případech ochranné senzory mohou být zároveň i řídicí, například variabilní rekuperace. Nejčastěji jsou tyto části připojeny přímo na řídicí jednotku, kam také vysílají jednoznačný signál (ano, ne), případně regulují intenzitu signálu. Naše jednotka je schopná zpracovávat jednoduchý analogový signál a je možné do ní posílat

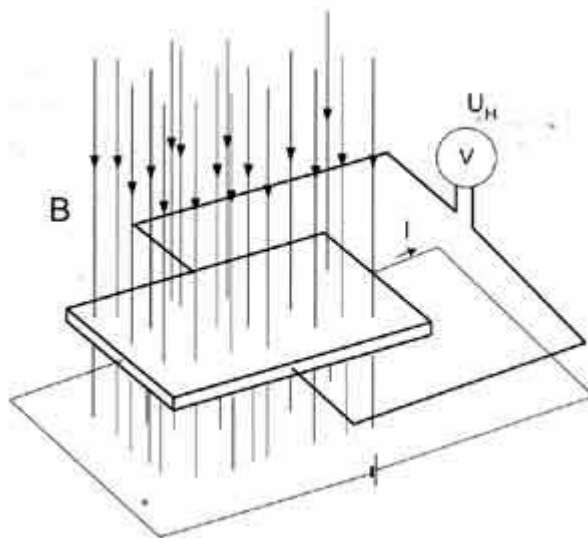
i signál digitální. U komplikovanějších a sofistikovanějších vozidel se z důvodu zjednodušení kompletního kabelového systému signály sbíhají v datovém jádru, které posílá veškeré informace nejčastěji přes **CAN** sběrnici do kontroléru a ten reaguje na příchozí zprávy. Jelikož frekvence těchto zpráv bývá zpravidla **500kb/s až 1Mb/s**, rychlost a reakce se dějí v reálném čase. V této kapitole budou analyzovány snímače a senzory, které jsou využívány na elektrokolech Boxxbike, a které využívá i většina ostatních výrobců. Každý výrobce si samozřejmě může přidat do systému svoje typy senzorů a snímačů, pokud pro ně má naprogramovaný vstup a výstup na řídicí jednotce.

Prvním a asi nepoužívanějším a nejrozšířenějším snímačem je elektronická součástka s názvem Hallův snímač, který je založen na technickém využití tzv. Hallova jevu. Používá se pro měření a automatickou regulaci magnetických polí, měření stejnosměrných proudů, ovládání velkých elektromotorů a také měření součinu veličin, které jsou převáděny na součin magnetické indukce násobené stejnosměrným proudem (okamžitý výkon). Dále se často využívají na bezkontaktní spínače a mechanické snímače pro určení polohy, otáček, případně také zrychlení. Má obrovské pole využití ve všech odvětvích průmyslu. V automobilovém průmyslu je také velice často využíván pro měření rychlosti otáček klikového hřídele.

Jedná se o součástku, která je tvořena úzkou a poměrně velmi malou polovodičovou destičkou, přes kterou prochází proud. Pokud je tento článek vložen do magnetického pole a skrz toto pole prochází indukční tok, dochází k přeskupování náboje na destičce na jednu stranu. Tímto způsobem na Hallově sondě vzniká napětí, které se nechá vypočítat pomocí vzorce:

$$U_h > k * I * B [V] \quad (1.)$$

Konstanta „k“ zahrnuje v sobě typ materiálu a tloušťku destičky, „I“ je stejnosměrný proud a „B“ je magnetická indukce způsobená magnetickým polem.



Obr. 9: Rozbor a popis Hallovy sondy se směrem magnetické indukce [16]

Hallův snímač je nejčastěji zapouzdřen do keramického obalu. Uvnitř pouzdra je polovodičová destička nejčastěji sloučeniny **InSb** india a antimonu případně **InAs** india a arsenu s odporem **0,01 až 20 Ohmů** při tloušťce okolo **0,1 mm**. Jedná se o kompromis mezi maximem citlivosti a mechanické pružnosti při obdélníkovém tvaru, který je nejčastější pro většinu typů Hallových sond. Obecně je snímač opatřen dvěma nebo třemi připojujícími piny. Slouží k přívodu proudu a odvodu napětí, které

proteče přes sondu. Nepůsobí-li magnetické pole, jsou proudové dráhy v destičce rozloženy rovnoměrně a Hallovo napětí je nulové. Naopak pokud je snímač vystaven magnetickému poli, působí na něj magnetická indukce, která působí kolmo na směr tekoucího proudu a tím pádem stlačuje proudové siločáry k jedné straně. V důsledku tohoto jevu vzniká na kontaktech rozdíl potenciálů, zvaný Hallovo napětí. Čím je destička v tenčím provedení, tím je vyšší citlivost na menší změny.



Obr. 10: Klasické provedení běžné Hallové sondy, na kterou je přivedeno napětí a výstupem je signál měnící se s rostoucím nebo klesajícím magnetickým polem.

Princip fungování této sondy je velice jednoduchý. Na vodiči naměříme napětí V a protékající stejnosměrný proud a kolem něj vzniká magnetické pole. Magnetické pole se indukuje v jádře a vzniká magnetický tok, který protéká Hallovou sondou. Při průtoku magnetického toku, díky funkci Hallova článku vzniká Hallovo napětí, které je velmi nízké, a proto je nutné jej zesílit přes zesilovač. Poté je na výstupu možné už měřit výsledné zesílené napětí, které je přímo úměrné měřenému stejnosměrnému proudu. [17]

Momentový snímač

Momentový snímač se nejčastěji na elektrokolech používá spojený s činností šlapání. Má za úkol snímat sílu na šlapkách od jezdce a předávat řídicí jednotce informaci o dávkování výkonu motoru. Princip je velice jednoduchý a bude uveden na příkladu. Ještě je nutné podotknout, že výstupem momentového snímače je napětí v závislosti na příslušeném momentu na šlapkách. Momentový snímač může být nastaven buď pro řízení funkce proudu do motoru a nebo kombinací dvou veličin, proudu a napětí. Řízení obou veličin není nikdy úplně přesné a je závislé na doprogramování funkce chování veličiny druhé, je proto lepší proud řídit pouze momentovým senzorem a napětí řídit kadenčním snímačem a využít tak dva senzory pro přesně daný účel. Pokud snímač určuje pouze proud, určuje v podstatě kroutící moment motoru. Tedy motor se může otáčet pomalu, ale s vysokým momentem. To je vhodné například při rozjezdech do kopce nebo v technické části terénu, kde není možný rychlý průjezd. Momentový snímač je používán na dražších kolech, protože komponenta musí obsahovat určitý typ snímače plus vyhodnocovací desku s procesorem ke zpracování jedné části signálu a odeslání do řídicí jednotky. Je důležité zpracovat sílu na napětí a to dostat do rozsahu, ve kterém většina jednotek nejčastěji funguje, tedy rozsah **0-5 V**. Při porovnání dvou produktů jednoznačně poznáme, který z nich se chová intuitivněji. Tedy, který je schopen lépe číst obtížnost terénu. Slíbeným příkladem chování je situace, kdy jede jezdec na elektrokole s momentovým snímačem, dostává se do náhlého prudkého stoupání, kde musí vysednout ze sedla a více přišlápnout do pedálu. Například podcenil situaci se stoupáním a nebo si zapomněl přehodit na nižší převod, tím pádem se musí hodně opřít do šlapek. V okamžiku, kdy zabere, jednotka začne

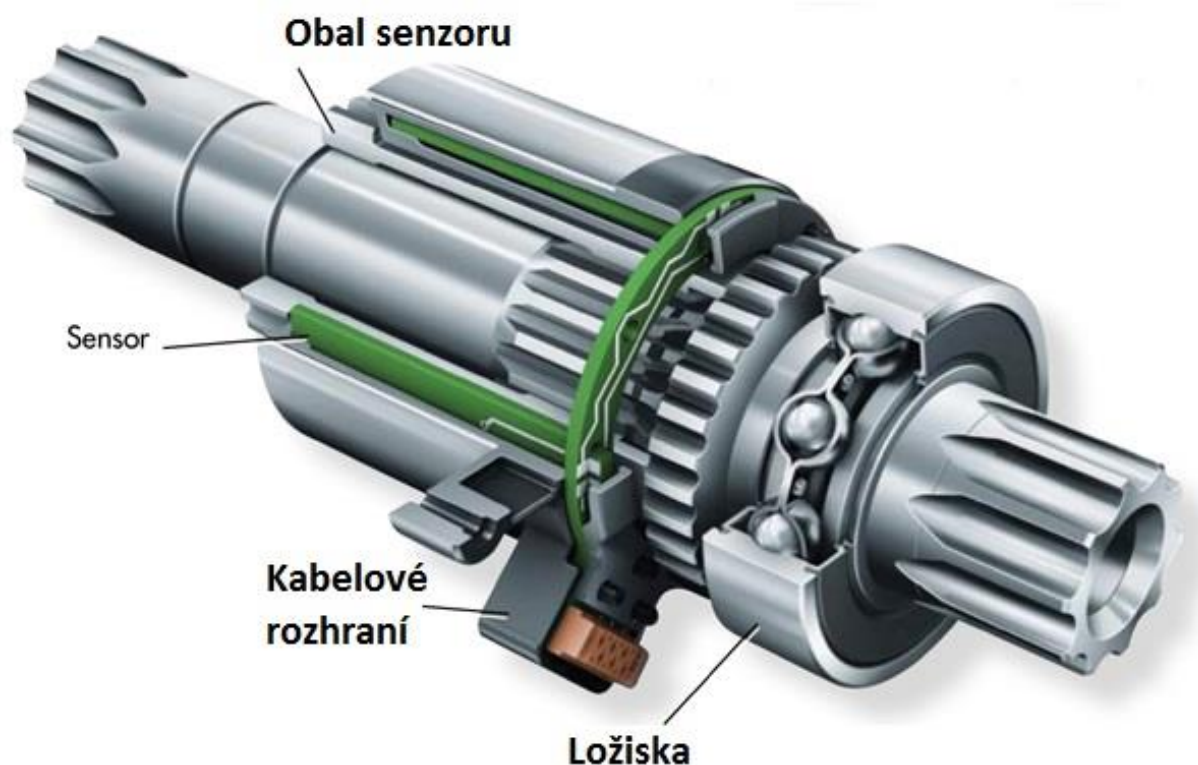
do motoru pouštět vyšší výkon a rázem jezdec nabere rychlost i do stoupání a může si zpět sednout do sedla a pohodlně opět šlapat.



Obr. 11: Použití momentového senzoru na řetězu (jedná se o levnější a méně přesné řešení) – stále ale funguje spolehlivě

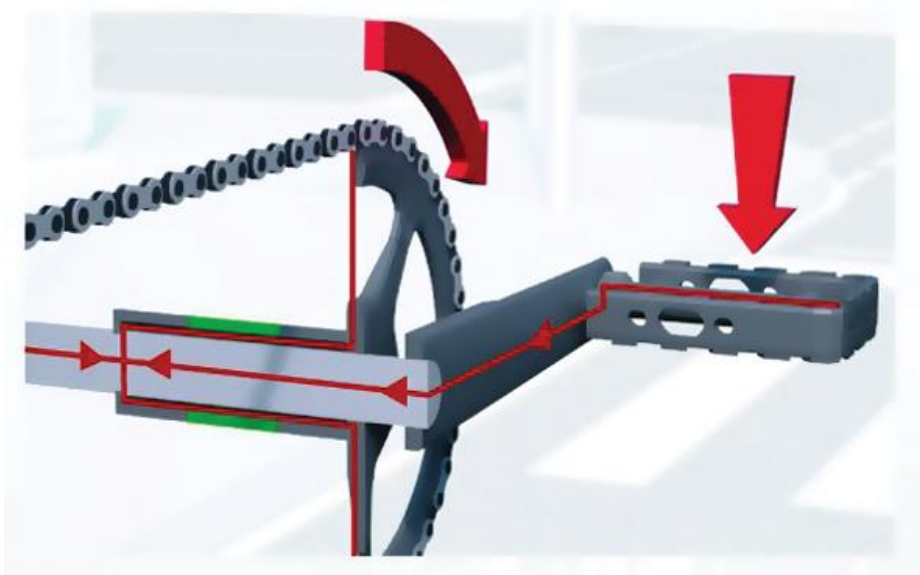
Momentový snímač je možné řešit přes namáhání od řetězu. Toto řešení je jednodušší a je možné jej snadno aplikovat téměř na všechny systémy. Nemusí proto být přímo zabudován ve šlapkách. Je možné s tímto řešením dělat různé experimenty a otestovat si pozice, kde je funkce nejlepší. Nejčastěji se však montuje v blízkosti šlapacího středu. Tato verze také nabízí dodatečné nastavení rychlosti odezvy, snímání, trvání a dalších drobností, kterými lze jízdu udělat příjemnější. Obecně je největší výhodou tohoto řešení dodatečná instalace. Například při koupi horšího a levnějšího typu elektrokola je možné ho dodatečně doinstalovat. Je dobré, že řešení funguje na základě stejného signálu jako signál akcelérátoru, takže se nechá zkombinovat i s levnými jednotkami. Takové řešení, ale není právě šťastné, protože jak bylo řečeno výše, v této pozici funguje snímač na základě aproximace napětí na proudu, což nezaručuje dostatečnou přesnost a může tak způsobovat nekorektní chování.

Naopak řešení, které představuje následující obrázek, znamená sofistikovanější a přesnější zpracování a chování. Zde už je signál rozdělen na dvě části, tedy zvlášť signál kadence a zvlášť signál momentu. Tato komponenta standardně řeší oba tyto problémy najednou.



Obr. 12: Momentový a kadenční snímač přímo v šlapacím středě. Často je zakomponován přímo do motoru. To je možné vidět na BOSCH motorech [18]

Axiální tenzometrický senzor snímá krut a radiální senzor slouží k vyhodnocování dat a zároveň snímá kadenci šlapacího středě. Na tomto základě mikroprocesor data zpracuje a přes kabelové rozhraní posílá dále do řídicí jednotky, která tento signál vyhodnotí a chová se podle něj. Celý proces je velice rychlý a intuitivní. Toto řešení je ale podstatně finančně náročnější a komplikovanější na zástavbu, protože ne každé kolo má stejný šlapací střed, stejně široký a nebo stejný závit pro upevnění. Proto se už při návrhu celého elektropohonu musí brát v úvahu, jaký systém bude využit. [18]



Obr. 13: Schéma toku síly při šlápnutí do pedálu a vliv na momentový senzor uložený v šlapacím středě (zelený díl) [18]

Kadenční snímač

Kadenční snímač bere v potaz pouze kadenci, jakou šlapete. Jedná se o jeden z nejjednodušších snímačů elektrokola. Na základě šlapání a zvoleného typu senzoru se musí nastavit pouze výchozí hodnota snímání a poté dochází k napočítávání jednotlivých tiknutí senzoru podle toho, jak často proběhne vysílač okolo senzoru. Vše je realizováno pomocí velice jednoduchého zařízení, které se díky své jednoduchosti rychle uchytilo. Jedná se většinou o plastový kotouč s určitým počtem zalisovaných magnetů po obvodu.



plastový kotouč na šlapacím středu s pevně nalisovanými magnety po obvodu

Senzor je pevně přidělaný na rámu kola. Čte kolem něj obíhající kotouč.

Obr. 14: Upravená fotka ze zdroje – náhled na kadenční snímač [19]

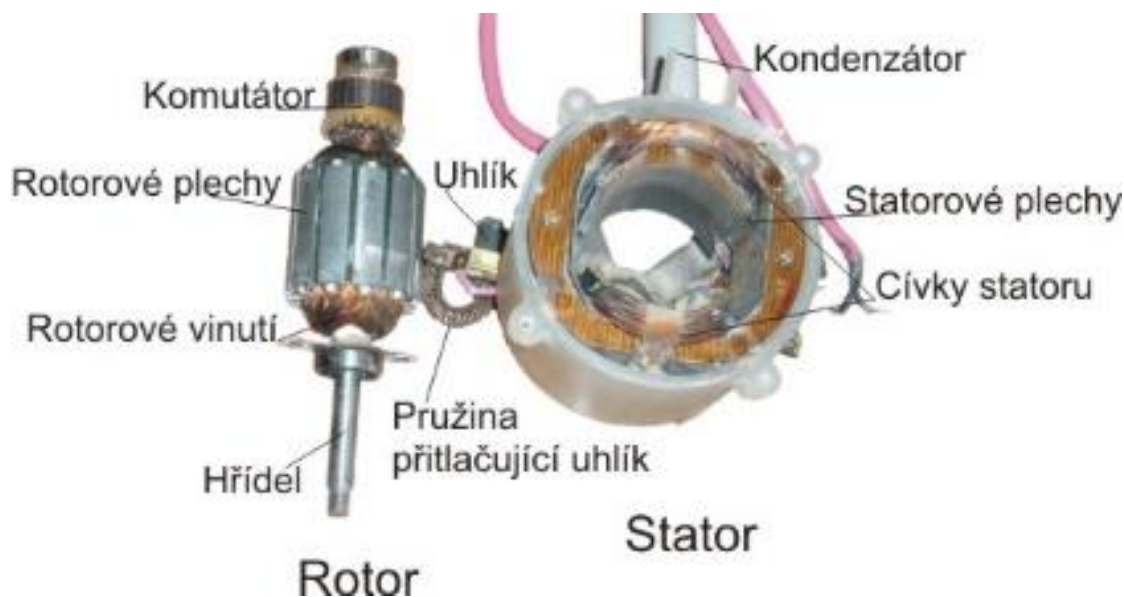
Právě počet magnetů je výchozí hodnotou pro chování systému. Obecně platí, že čím více magnetů, tím systém reaguje rychleji a citlivěji. Tento kotouč se upíná na šlapací střed a cestuje s ním. Drží tam pomocí plastových zubů, které obejmou osu šlapacího středu. Je nastaven pro otáčení pouze jedním směrem, ale existují i jednotky, které reagují i na šlapání zpět a to nikoliv jízdou vpřed, ale naopak bržděním pomocí rekuperace. Chování je velice podobné starým kolům, na kterých se dříve takto brzdilo. Na pevno přidělaný snímač má za úkol pouze snímat probíhající magnety a napočítávat úhlovou rychlost. Tyto informace odesílá do řídicí jednotky. Ta už se chová na základě svého programování. Na horších typech elektrokol najdeme tyto snímače, které jsou používány právě pro svou jednoduchost a cenu. Na elektrokola určená pro městský provoz nebo pouze pro provoz po pozemních komunikacích se mohou tyto snímače zdát dostačující. Avšak pokud je potřeba lepší kolo do terénu, s rychlými reakcemi, tak tento systém velmi zaostává. Většina výrobců jednotek a elektrokol se snaží uměle doprogramovat moment na šlapkách v závislosti na kadenci, ale to je dle mého názoru mylná cesta. Tento senzor se nechá velice jednoduše obelhat. Řídicí jednotky jsou nastaveny tak, aby při nízké kadenci dávaly vysoký výkon a naopak. Řídicí jednotka čte nízkou kadenci, tedy jezdec nestačí na jízdu svými silami, a proto mu přidá více výkonu od motoru. Tedy je možné jet z kopce, šlapat pomalu a motor přidává více a více výkonu. Vytrácí se tedy z celého systému efektivita a rozumné nakládání s elektrickou energií.

3.3.3 Elektromotory

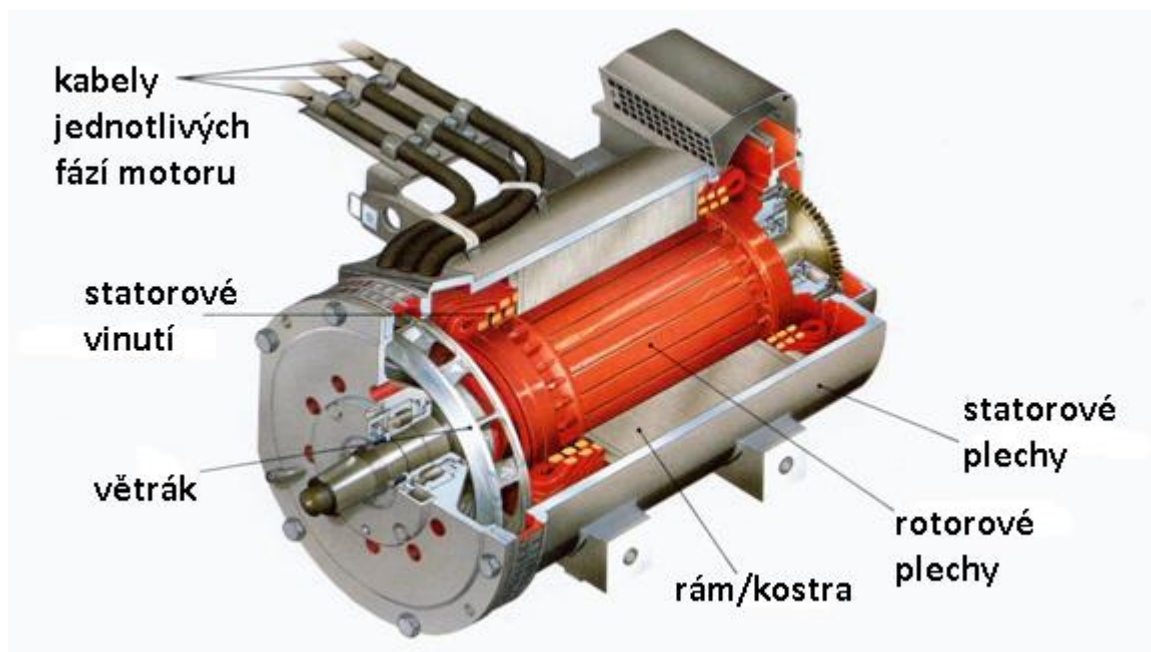
Elektromotory prodělávaly veliký vývoj od **18.století**, kdy se s nimi začalo poprvé experimentovat. Mezi první konstruktéry elektrovozidel u nás patří známý František Křižík, který sestrojil automobil poháněný čistě na elektrickou energii. Dále experimentoval také s automobilem na elektřinu i se spalovacím motorem, který přes dynamo dobíjel baterie. Ve chvíli, kdy se objevila možnost snadného zpracování a dalšího využití ropy, se to ale ukázalo jako zbytečné. Vlastníci ropných polí využili příležitosti a s nástupem elektrického startéru od vynálezce Charlese Ketteringa odpadlo otravné a namáhavé startování dopravních prostředků přes kliku. Poslední problém, kterým bylo klepání motoru, byl odstraněn díky použitím olova ve směsi benzínu. Poté už nestálo v cestě rozvoji spalovacích motorů nic. Stačilo pár zákonů, trocha marketingu a veřejnosti byla představena nová forma dopravy pomocí spalovacího motoru. Byla prezentována jako jediná možná cesta a potlačila tak na delší dobu celý další vývoj elektrovozidel. [20]

Elektromotory našly své uplatnění hlavně mimo automobilový průmysl a dlouhá léta bylo pole působnosti směřováno hlavně na motory pracující na střídavý proud a napětí. Tehdy i dnes je stále limitujícím faktorem ukládání energie a zpětné odevzdávání do systému resp. baterie. Proto je většina elektropohonů soustředěna v oblastech a místech, kde běžně narazíme na střídavý proud. Každá běžná zásuvka v domě nebo výrobní hale je napojena na elektrickou síť poskytující právě střídavý proud a napětí.

Klasické stejnosměrné elektrické stroje byly dříve známy hlavně ve verzi s kartáči a komutátorem. Tyto elektrické stroje se objevovaly hlavně v podobě dynamu pro svícení a v podobě motoru pro startování na starších typech motocyklů nebo startérech automobilů. S příchodem polovodičových součástek se začaly stavět regulátory, které zajišťovaly elektronickou komutaci. Komutace je činnost, která přepóluje proud směřující do rotorových cívek v okamžiku, kdy je daná cívka napájena a je pod aktivním pólem. Začalo se experimentovat s použitím lepších plechů a komponent, se změnami uspořádání, s poměry mezi satorovými drážkami a počty magnetů a navinutím satorů případně rotorů. Začaly se stavět motory s permanentními magnety, které značně zjednodušily výslednou stavbu a výrobu elektromotoru.



Obr. 15: Rozložené stejnosměrné dynamo a jednotlivé části statoru a rotoru [21]



Obr. 16: Asynchronní motor v řezu na třífázové střídavé napětí a proud [22]

Příklad jednoduchého asynchronního motoru. Asynchronní motor je jednoduchý na stavbu a je celkově jednoduchý i na výrobu. Pracuje se skluzem, který se děje mezi statorem a rotorem. V elektromobilitě není často využíván vzhledem ke své poměrně nízké účinnosti a vyšší váze v poměru váha/výkon/účinnost. Vyniká ale svojí jednoduchostí, praktickou bezúdržbovostí a robustností. Automobilka Tesla jej používá do všech svých vozidel.

V dnešní době jsou jednoznačně nejvyužívanější elektropohony respektive motory na stejnosměrný proud v systému s řídicí jednotkou a akumulátorem. Jedná se o tzv. motory BLDC neboli „brushless direct current“, tedy bezkartáčové na stejnosměrný proud s permanentními magnety. Jedná se o motory, které vynikají vysokou účinností a výbornými vlastnostmi. Fungují stejně jako klasické kartáčové motory, proti kterým ale mají několik podstatných výhod. Při dlouhém provozu nedochází k opotřebení kartáčů, protože žádné nemají. Dále nedochází k jiskření okolo komutátoru. Nespornou výhodou je i lepší regulovatelnost otáček a výkonu, díky čemuž se s tímto typem motoru na stejnosměrný proud daleko lépe pracuje. Proto se během několika let značně rozšířily do všech odvětví. Nejčastěji je možné se s ním setkat právě u klasických elektrokol, aku náradí a dalších. V dnešní době je možné je najít v obrovském množství provedení od malých motorků pro RC modely výkonem pár wattů až k velkým motorům s výkony v řádech kilowatt.

za účelem dosažení lepší účinnosti s méně vířivými proudy a se správným nastavením počtu slotů statoru oproti drážkám rotoru. SPM motory se nedají přetěžovat, což je naopak výhoda IPM.

Kvality IPM motoru se nacházejí v trochu nižší účinnosti, ale ve velmi širokém spektru otáček. Dají se velmi dobře přetěžovat nad svoje limity a jsou schopné krátkodobé přepětí velmi dobře zvládat. Mají pozvolnější momentovou charakteristiku. Mezi hlavní nevýhody patří komplikovaný návrh. Pro výsledek je klíčové drážkování a celkové designování rotorových plechů. IPM motory pracují hlavně s reluktančními momenty, které jsou schopné proudit přes díry a drážky v plechách. Pro návrhy těchto motorů se často používají návrhové softwary, které pomohou s bližším pohledem na tok reluktančních momentů a magnetismus v motoru. [25]

Z výše zmíněných výhod a nevýhod jasně vyplývají možnosti využití. SPM motory se daleko více hodí do mechanismu nebo pohonu s dalšími převody. Je dobré stále udržovat motor v chodu v optimálních otáčkách, jedině tak může být dosaženo vysoké účinnosti v širokém spektru. Proto SPM motory najdeme ve většině elektrokol, protože pomocí zadní řadící kazety je motor udržován v optimálním pracovním prostředí. Z vlastní zkušenosti a měření vím, že při jízdě v terénu na mém nezpřevodovaném kole se **30-40 %** času pohybují mimo optimální pracovní prostředí. Účinnost mého SPM motoru je mezi **60-65 %** z celkové doby jízdy, což je velice málo z jeho maxima **88 %**. Je proto vhodné tyto motory používat spolu s převodovým mechanismem.

Naopak IPM je právě díky své účinnosti v širším spektru otáček velice výhodné použít bez převodového mechanismu a tím podstatně zjednodušit celý systém. Obecně IPM dosahuje účinnosti okolo **70-80 %** stabilně. Přispívá k tomu i jeho momentová charakteristika, která neroste tak prudce jako u SPM a tím nabízí plynulý tah v celém rychlostním spektru.

4. PŘEDSTAVENÍ KOLA BOXXBIKE ADVENTURE

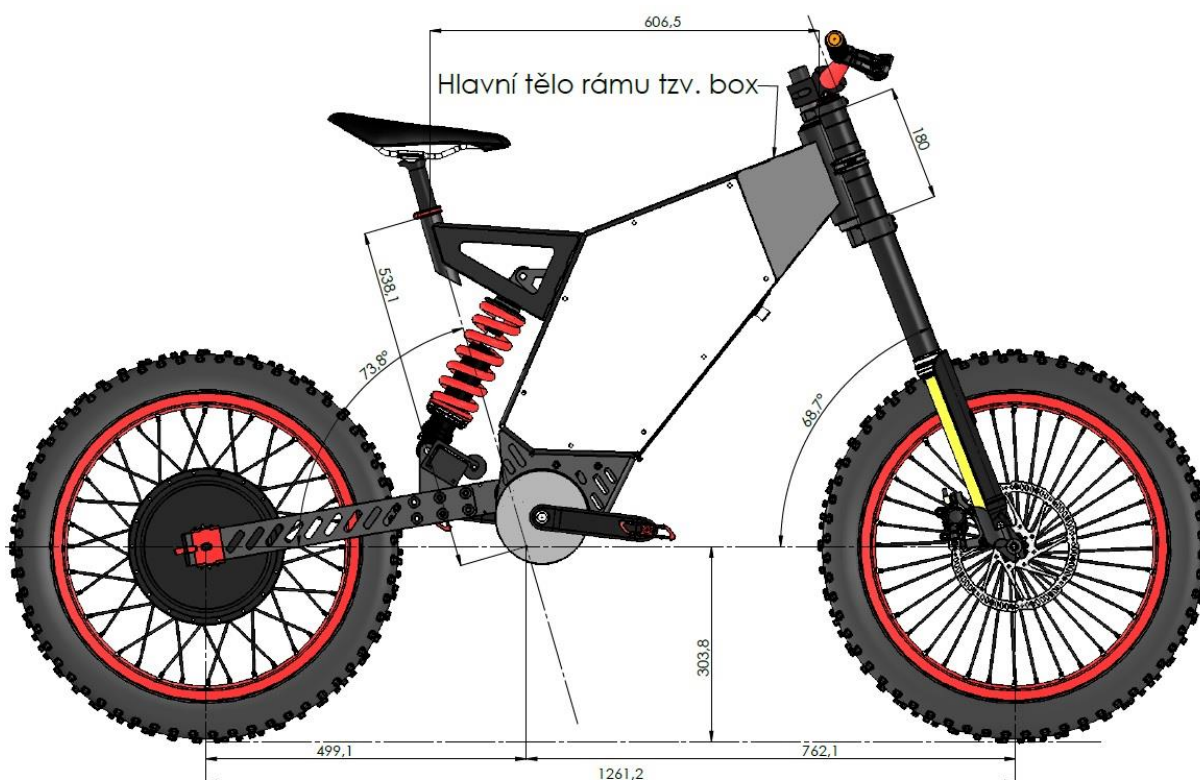
Boxxbike Adventure představuje hybrid mezi kolem a klasickým motocyklem. Je možné říci, že každý si v tomto typu najde to své. Dle legislativy je model Adventure moped se šlapkami typu **L1-A**. Jelikož moped není často používaný termín, většina lidí řekne, že v tom vidí spíše motorku, jiní to zase vidí více jako kolo. Na tomto modelu jsem začal pracovat zhruba před dvěma lety. Úplně první nápad se dostavil ve chvíli, kdy jsem si postavil své první obyčejné elektrokolo, vypořádal jsem se s prvními problémy a začal jsem jezdit v terénu. Po rekapitulaci svých myšlenek a nápadů jsem došel k závěru, že je potřeba více výkonu zvláště v obrovských stoupáních, kde ani nejnížší převod plus elektromotor neplnily svoji funkci optimálně. Začal jsem konstruovat návrh a tělo tak, aby byla kam vložit řídicí elektronika, která bude chráněna před povětrnostními vlivy, a zároveň zde bude uložena baterie pro elektropohon. Z tohoto návrhu nakonec vznikl tvar i technologie, kterou se bude rám vyrábět. Za každou cenu jsem chtěl zachovat nejdůležitější prvek kola, kterým je šlapací střed, tak, aby měl stále vliv na chování i při vyšším výkonu a vysoké rychlosti. Tento úkol jsem vyřešil pomocí několika senzorů a planetové převodovky ve šlapacím středu. Výhodou byl zadní motor v náboji kola, který má stálý převod s kolem **1:1**, a je nezávislý na řetězu a šlapání. V praxi to znamená, že je možné jet i bez řetězu. Důležité bylo jenom správné zkalkulování senzorů a zvolení správného počátečního převodového stupně tak, aby pomocí planetové převodovky bylo možné šlapat a mít kontakt s pedály i v rychlosti přesahující **40 km/h**. Planetová převodovka nabízí dva rychlostní stupně. První rychlostní stupeň je s vyřazenou planetovou převodovkou, tedy pouze převod mezi hnacím a hnacím řetězovým kolem. Druhá rychlost je přenásobená převodovým poměrem z převodovky. Na modelu Adventure je vyřešena velmi dobře zadní brzda, která je realizována pouze jako variabilní rekuperace s proměnlivým brzdícím momentem v závislosti na síle signálu brzdové páčky. Tedy do páčky jsem zakomponoval snímací čidlo, které podle délky stisku brzdové páčky vysílá proměnlivou úroveň intenzity signálu a na tomto základě, si jednotka určuje velikost brzdícího účinku. Celý systém je velmi intuitivní a jezdec nepozná rozdíl, jestli brzdí mechanickou zadní brzdou nebo pouze variabilní rekuperační brzdou. Čím více brzdovou páčku zmáčkne, tím větší brzdící síla na kolo působí a naopak. Variabilní rekuperace se na trhu nevyskytuje, a proto bylo nutné ji kompletně celou navrhnout a zakomponovat do brzdového systému. Mám vyzkoušeno a změřeno, že z celkové kapacity baterie se narekuperuje okolo **10%** energie zpět. Z pohledu nízké hmotnosti se jedná o slušný výsledek.



Obr. 19: Kolo Boxxbike Adventure

4.1 Vzhled a stavba

Celkový vzhled kola Adventure se odvíjel především od řídicí elektroniky a baterie. Jako nejlepší formu ochrany jsem zvolil krabici, tzv. box, který zabrání pronikání vody, prachu a odolá i dalším povětrnostním vlivům. Zároveň byly dodržovány proporce a rozměry klasických teréních kol. Od tzv. boxu vznikl i název společnosti, tedy Boxxbike. Od začátku byl kladen důraz na kvalitu zpracování a hlavně na kvalitu komponent a jejich funkčnost. Klíčovou podmínkou byla maximální jednoduchost údržby elektropohonu vzhledem ke spalovacímu motoru. Tato podmínka byla upřednostňována před samotným designem a váhou produktu a komponent. Jízda v těžkém terénu je velmi náročná pro kolo jako celek, zvláště v kombinaci s vysokou rychlostí a silou elektropohonu.



Obr. 20: Geometrie a tvar kola Boxxbike Adventure

Větší předsazení přední vidlice má za následek lepší funkci a pohodlí při pobírání nerovností a celkově přináší pohodlí pro samotného jezdce. Při jízdě v terénu je celkově důležité mít řízení pevně pod kontrolou, aby nemělo tendenci ztrácet stabilitu. Je důležité najít správné předsazení pro konkrétní účel použití, protože tím přímo ovlivňuje namáhání samotného rámu a tlumiče. Celý rám je posazen velmi vysoko a poskytuje tak výbornou prostupnost v terénu, přejezdy přes kameny a klády, případně i jízdu ve vysokém bahně. Masivní a dlouhý krk zajišťuje velmi kvalitní a pevné uložení přední vidlice, která je v terénu extrémně zatěžována.

4.2 Specifikace, parametry a popis

Parametry a specifikace se dělí na dvě hlavní skupiny a těmi jsou elektrické části a mechanické části.

Technické parametry (mechanické části):

Odpružení přední	DNM USD-8 – zdvih 200 mm, kombinace vzduchu, oleje, pružiny
Odpružení zadní	DNM MT-AR – zdvih zadního tlumiče 100 mm, tuhost 96 N/mm
Přední kolo	19“ hliníkový ráfek z EN AW 7075 T6
Zadní kolo	19“ hliníkový ráfek z EN AW 7075 T6
Rozměr přední pneumatiky	19“ x 3 – pneumatika určená pro terén
Rozměr zadní pneumatiky	19“ x 3 – pneumatika určená pro terén
Pohotovostní hmotnost	65 Kg s baterií
Maximální hmotnost jezdce	110Kg
Rám	Hliníkový
Typ rámu	Plech, svařovaný ohýbaný
Úhel hlavy řízení	69°
Planetová převodovka	I° = 1.45 / frek.šlapání 80ot/min = 13,3 km/h II° = 3.41 / 31,4 km/h
Přední řetězové kolo	32 zubů
Zadní řetězové kolo	22 zubů
Brzdy přední	Ø203mm rotoru dvoukotoučové hydraulické brzdy dvou pístkové
Brzda zadní	Ø203mm rotoru hydraulické brzdy dvou pístkové
Točivý moment motoru	165 Nm
Max otáčky motoru	650 /min
Výkon	ECO: 1,5 kW; NORMAL: 3,5 kW; BOOST: 6 kW
Max rychlost	Bez odbuzování – 55 km/h; s odbuzováním 87 km/h

Tab. 2: Technické parametry – mechanických částí

Technické parametry (elektrické části):

Baterie	16S16P = 256 článků 18650; Sanyo 3,4 Ah; 57,6 V 54 A = 3133 Wh
Doba nabíjení	Rychlé nabíjení 1700 W – 2 hod.; pomalé nabíjení 700 W - 5 hod.
Nabíječka	Serverový zdroj se stálým stejnosměrným napětím 42 V a proudem
Systém kontroly baterie BMS	Až 24S baterie, pasivní balancování; 8 teplotních čidel; komunikace CAN; 100 mA balancovací proud na článek
Výkon řídicí jednotky	Stálý výkon 8 kW, pasivní chlazení; 650 g váha; bezsenzorové řízení; 5 analogových a digitální výstupů
Momentový senzor	Nastavitelný zatěžovací moment, 5 V, úprava rampy přicházejícího a koncového signálu
Pas senzor	12ti magnet; aktivní snímání v obou směrech
Rekuperační brzda	Variabilní brzdny účinek vzhledem k rychlosti, maximální výkon brzdy 5 kW
Display	Kompletní diagnostika celého elektropohonu; aktivní komunikace s jednotkou a BMS; uživatelská obrazovka; BMS obrazovka
Motor	13,2 kg; 36 slotů/32 magnetům, sinusový průběh; 50 mm magnety BLDC motor se sinusovou komutací, typ SPM

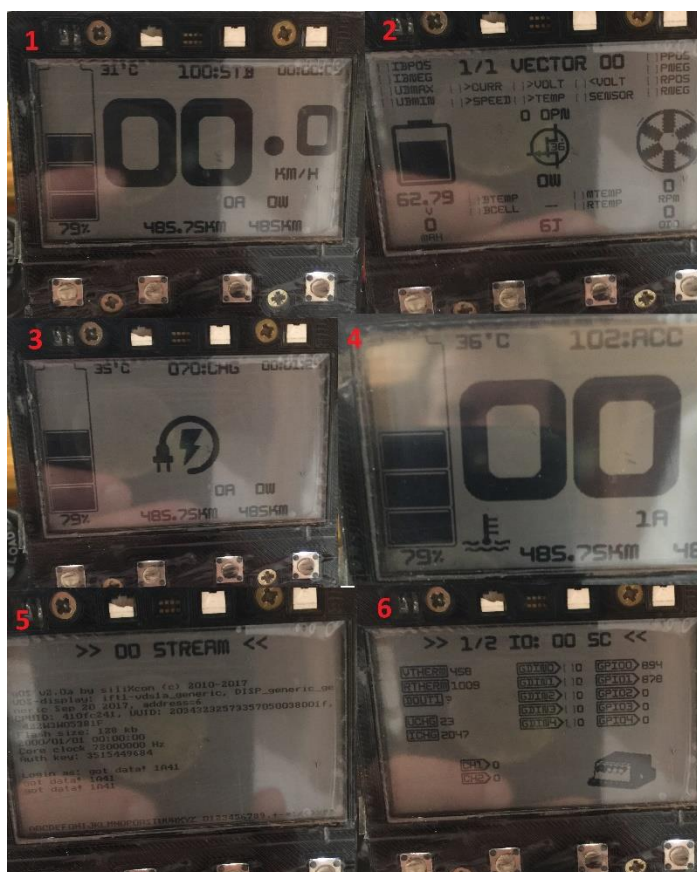
Tab. 3: Technické parametry elektrických částí

Nyní krátce popíšu některé zajímavé mechanické a elektrické části. První důležitou částí je planetová převodovka. Díky této části a vysokému převodu, ze kterého se skládá, je možné držet kontakt se šlapáním i při vysoké rychlosti a tím přímo ovlivňovat řídicí senzory.



Obr. 21: Schlumpf high speed drive – šlapací střed s planetovou převodovkou

Dalším podstatným komponentem je display. Na následujícím obrázku je vidět část jeho funkcí. Slouží jako nástroj k rychlému informování o veškerém chování všech dalších zařízení.



Obr. 22: Display a část jeho obrazovek, které nabízí pro uživatele

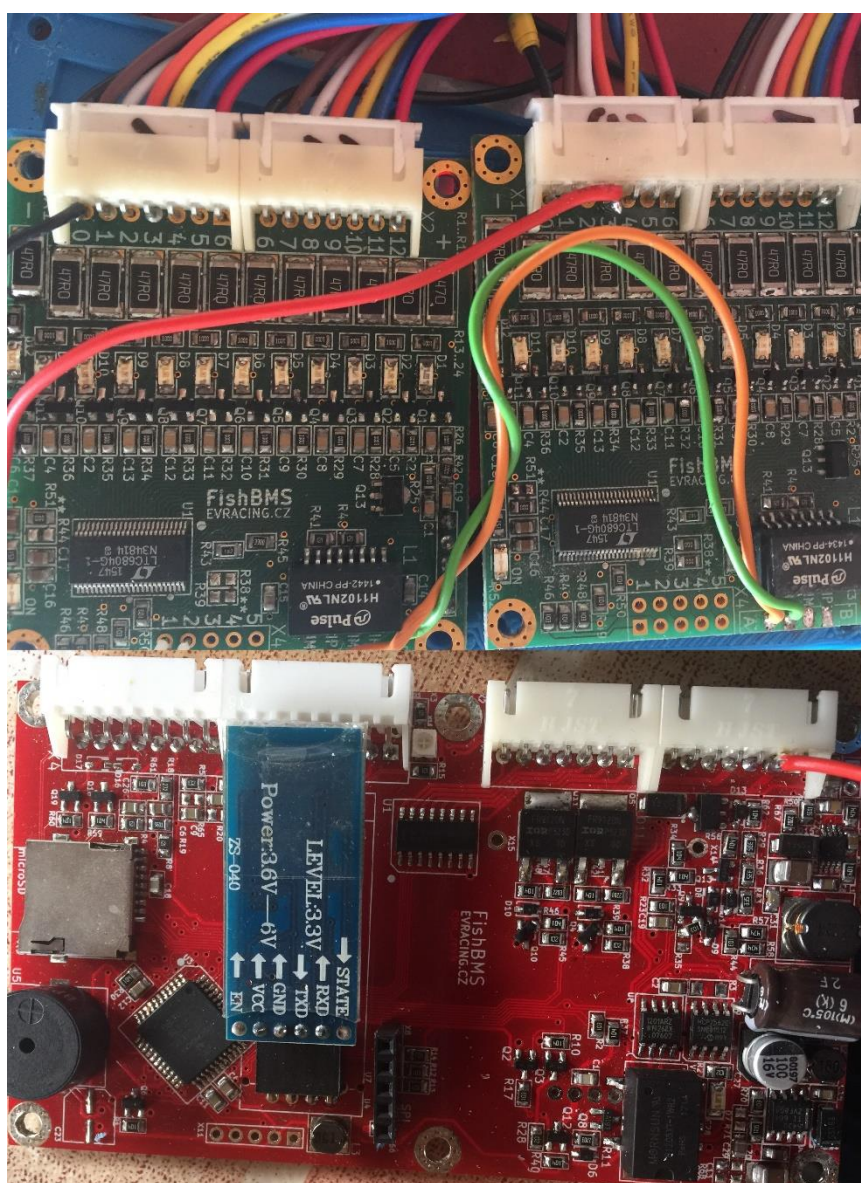
1. základní obrazovka – informuje jezdce o stavu baterie, rychlosti, ujeté vzdálenosti a celkovém nájezdu
2. obrazovka s analýzou – ukazuje, kam teče energie, kudy se vrací, co nás omezuje při jízdě např. teploty, napětí, proudy, senzory atd.
3. nabíjecí obrazovka – informace o výkonu, který teče do baterie a jak stoupá stav nabití;
4. obrazovka s jedním z varovných signálů upozorňuje na vysokou teplotu od motoru, jednotky nebo baterie;
5. terminálová obrazovka – umožňují zadávat příkazy přímo do řídicí jednotky (později bude uzamčena)
6. obrazovka periférií – tato obrazovka nás informuje o stavu a funkci vše řídicích periférií jako jsou plyn, senzory, teplotní čidla atd.

Dalším velice zajímavým komponentem je baterie kola Adventure. Je složena z **256** článků baterie **Li-ion 18650 Sanyo GA 3450mAh**. Na tyto kapacitní baterie padla volba především proto, že takto poměrně velká baterie je schopná zvládat i vysoké výkony, protože proud, který se z ní odebírá, se rovnoměrně rozloží mezi všechny paralelní větve. Konkrétně se proud pro baterii dělí v tomto případě šestnácti, protože uspořádání činí **16S** a **16P** neboli v překladu **16** článků zapojeno do série a **16** větví zapojených paralelně. Tím je možné se dostat na vyšší napětí. Zapojením paralelních větví se dostáváme na vyšší kapacitu baterie. V mém případě se bavíme o **57,6 V** nominální napětí a **54 Ah** při standartním zatěžování. Na hodnotu, která zde bude vypsána a vysvětlena, se budu v této práci odvolávat i v části věnované stanovení konečného dojezdu. Moje baterie pracuje pouze s kapacitou nabití do **95 %**. Nabíjíme na nižší napětí, než je maximální napětí a vybíjíme na vyšší napětí, než je minimální. Tedy dostávám se někde k **15 %**. Využívám tedy maximálně **80 %** energie z baterie. Z celkové zásoby watthodin používám pouze **2543 Wh**. Tedy pokud platí **1 Wh = 3,6 kJ**, znamená to, že pro jízdu je k dispozici při „plném nabití“ do „úplného vybití“ celkem **9154,8 kJ** energie. To bude právě hodnota, na kterou se budu později odkazovat.



Obr. 23: Obrázek posvařovaného bateriového packu, příprava kompletní kabeláže, usazení do hliníkového obalu, zalití teplovodivou hmotou pohlcující vibrace kvůli svarům na článcích a usazení do rámu těla Boxxbike Adventure

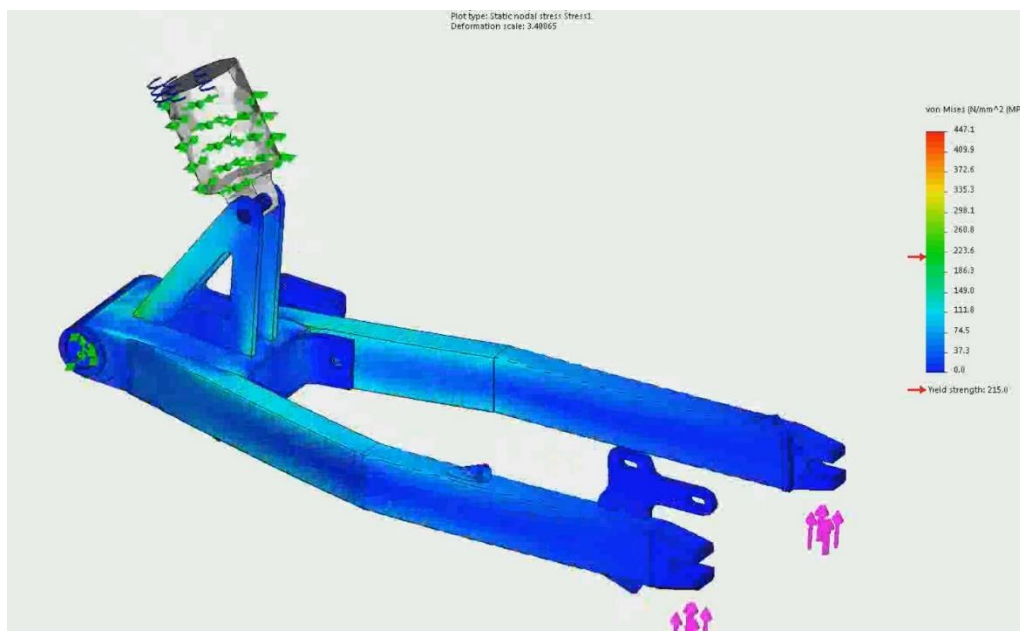
Poslední představenou částí bude BMS neboli „battery management system“. Volně přeloženo - jedná se o zařízení, které po celou dobu analyzuje a vyhodnocuje nabíjení a vybíjení jednotlivých článků. Na výsledku těchto analýz a vyhodnocení přímo závisí, jak se celá jednotka chová. Naše BMS je přímo propojená s řídicí jednotkou, do které odesílá své informace a řídicí jednotka na ně reaguje. Přes BMS se analyzují napětí, vybíjecí proudy, teploty a je možné analyzovat i další veličiny. Na trhu můžeme najít sofistikované přístroje, ale i jednoduché „hloupé“ analogové systémy, které mají ve výchozím stavu základní nastavení a podle toho se chovají. Naše BMS se může volně přeprogramovávat podle velikosti baterie, typu chemie článků nebo případně teplot a napětí, které mohou být kritické pro celý systém. Je možné BMS použít na jakoukoliv baterii dostupnou na trhu. Baterie bývá nejdražší částí celého elektropohonu, a proto je nutné se o ni správně starat a věnovat jí maximální pozornost.



Obr. 24: Systém kontroly baterie (horní obrázek představuje balancovací moduly s přírodními balancovacími dráty od jednotlivých článků; spodní modul je tzv. chytrý modul, který vše řídí, čte, analyzuje, vyhodnocuje a komunikuje s dalšími zařízeními)

4.3 Vývoj kola

Tato kapitola je více informativní než vědecká a provede čtenáře problémy a vývojem celé společnosti a produktu kola Boxxbike Adventure. Budete seznámeni s hlavními problémy a klíčovými otázkami, které provázely vývoj, a s kroky, které vedly k odstranění těchto problémů. Velké množství detailů bude vynecháno, upozorním pouze na zajímavé milníky.



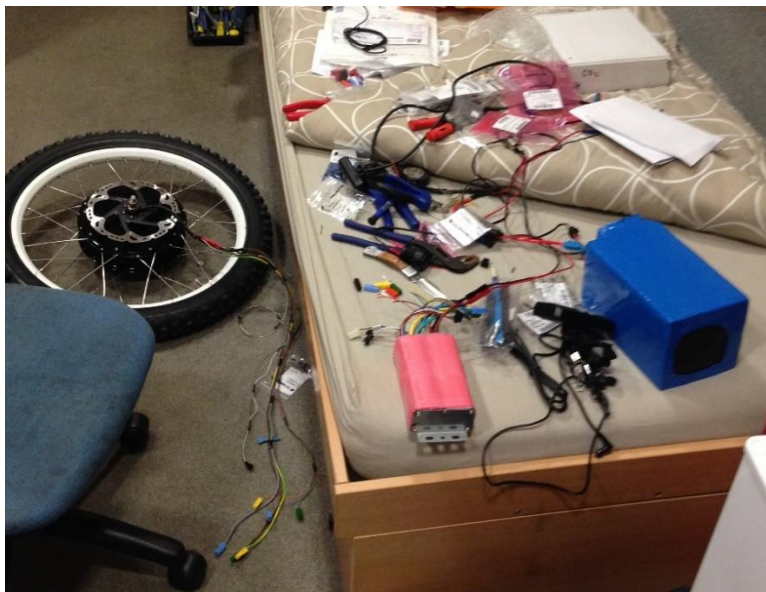
Obr. 25: Namáhání a MKP zadní vidlice při stanovených zatěžovacích stavech a krajních podmínkách

Začátek modelování a kontrola pevnosti rámu a jednotlivých dílů vedly v pozdější době k poměrně velkému množství změn. Při testování se osvědčila metoda konečných prvků, která správně předem diagnostikovala možná kritická místa. Trhliny nebo praskliny se objevovaly tam, kde se to dalo vzhledem k výsledkům metody konečných prvků očekávat a rám se musel předělávat.



Obr. 26: První rám a první prototyp

Na prvním prototypu se objevilo velké množství chyb. Nesprávně uložený šlapací střed, který nebyl v pozici sedu příliš příjemný, se musel posunout více dopředu. Rám byl vyroben z oceli a jeho váha byla **16 kg**, což bylo příliš v poměru s jeho následovníkem - hliníkovým rámem s celkovou hmotností **9 kg**. Celkově tento rám posloužil velice dobře k náhledu, co udělat v budoucnu jinak. Rám najezdil pár stovek kilometrů a mezitím se začínalo pracovat na novém typu. Došlo ke změnám v elektronice a je nutné podotknout, že každým modelem se firma posouvala k lepšímu a lepšímu produktu. Věci se stávaly více sofistikovanější a propracovanější. Tento rám je stále funkční a použitelný, nikdo jej však už nepoužívá, protože díky své váze není tak zajímavý a ubírá stroji na akceleraci a prožitku z jízdy.



Obr. 27: Začátky a zapojení kompletní elektroinstalace (první systém, který jsme začali používat)

Začal jsem s testováním elektroniky na prvních běžně dostupných produktech, které byly na trhu. První problémy jsem zaznamenal v oblasti řídicí jednotky. „Hloupá“ řídicí jednotka se špatně nastavovala, nezvládala potřebný výkon a brzdila motor. Jakýkoliv senzor nebo změna byly více méně nemožné. Cena byla velmi nízká a to se projevilo i na zpracování. Bylo třeba vyřešit tento problém jako první. Když jsem narazil na nové řídicí jednotky, nastaly nové problémy, které sice vedly k úžasnému prožitku z jízdy, ale motor se začal přehřívat a nestíhal požadovaný výkon při delší jízdě. Přestože výrobce tvrdil, že s tím nebude problém, bylo jasné, že se nedá věřit všemu, co je v datovém listu. Důležité je vždy se zeptat na podmínky, za kterých se motor nebo daná komponenta používala z dlouhodobého hlediska. Špičkový výkon je skvělý parametr, ale pro delší používání nic neříkající. Když se vyřešila výměna motoru, zbývala dořešit poslední zásadní věc a tou byla baterie. Přeprodávání hotových bateriových bloků byl problém kvůli požadovanému tvaru a výkonu, který jsem potřeboval specifikovat pro moje účely. Do této doby byly na trhu pouze elektrokola a pohony, které běžně pracovaly na napětí **24 V** a nebo **36 V**. V dnešní době se pracuje s napětími nad **48 V** a více. Všechny tyto problémy se postupně vyřešily v druhém a třetím modelu Adventure. Pro návrh baterie na míru jsem spolupracoval s jednou z českých firem, díky které jsem pochopil další potřebné zákonitosti a pravidla. Po otestování několika jednotek a motorů jsem narazil na další firmu, se kterou jsem začal úzce spolupracovat, a společně jsme nastavili a postavili Adventure do podoby a funkčnosti, na které můžeme ukázat technický pokrok a zpracování. Shodou náhod začínající firma byla složena z absolventů ČVUT fakulty elektrotechnické a VUT Brno a velice rychle doplnili hlubší informace a podstaty.



Obr. 28: Druhý prototyp Adventure

1. elektronika – došlo ke změně elektroniky a dodavatele; 2. mechanické části – využívání klasické přehazovačky pro udržení požadovaného kontaktu se senzory, které dosud nepracovaly správně; 3. první problémy se zadní vidlicí; 4. testování nových baterií; 5. základní display o stavu baterie



Obr. 29: Třetí prototyp Adventure

1. elektronika – došlo opět ke změně elektroniky a dodavatele; 2. mechanické části – využití planetové převodovky; 3. nová zadní vidlice; 4. nový motor; 5. opět nové baterie a výroba na míru svařováním; 6. přidán informující display o některých dalších částech kola; 7. správné vyladění šlapání a reakce senzorů; 8. vyřešené nabíjení přímo z jakéhokoliv DC zdroje (náš nápad využít motor a jednotku jako části, ze které se klasická nabíječka skládá)



Obr. 30: Poslední čtvrtá řada a menší série Adventure

Poslední model si zaslouží delší popis, pro který využiji poslední odstavec v této kapitole. Jaké jsou změny na tomto kole oproti ostatním? V první řadě je to kompletní elektronika. Oproti ostatním se jedná o kompletní systém, který komunikuje spolu navzájem a předává si informace. Komunikace začíná displejem, baterkou a řídící jednotkou. Byl zdokonalen systém nabíjení, který je nyní velice jednoduchý a je možné nabíjet jakýmkoliv DC zdrojem. Například to může být nabíječka od telefonu, baterka od auta, počítačový zdroj a další. V tom je tento systém unikátní. Další vývoj prodělal motor. Zde bylo přidáno boční a obvodové chlazení a tím se teplosměnná plocha zvětšila více jak **2x**. K tomu je do motoru přidávána speciální magnetická kapalina, která ulpívá na povrchu magnetů a tím pádem tepelně spojuje stator s rotorem a dochází tak o **100 %** k lepšímu a rychlejšímu převodu tepla na obal motoru a tím i rychlejšímu ochlazování při jízdě. Je tedy možné používat motor při vyšších výkonech po delší dobu a při větším kroutícím momentu. Byl lépe rozdělen signál ze senzorů a programově bylo upraveno chování tak, aby jezdec cítil, že „jeho nohy mají obrovskou sílu“ a může zvládnout cokoliv. Další část, které byla věnována vysoká pozornost, byla odolnost proti vodě, prachu a dalším vlivům. Ochrana, která je nyní na Boxxbike Adventure, si hravě poradí s vodou z tlakového mytí. Tomuto tématu byla věnována ve firmě velká pozornost, protože udržování našich kol pro zákazníky ve stále dokonalém stavu při půjčování, byla důležitá. Bezprostředně po jízdě v terénu je kolo k nepoznání, ale jeho uvedení do komfortního vzhledu je díky konstrukci velmi snadné.



Obr. 31: Kolo po ježdění v terénu

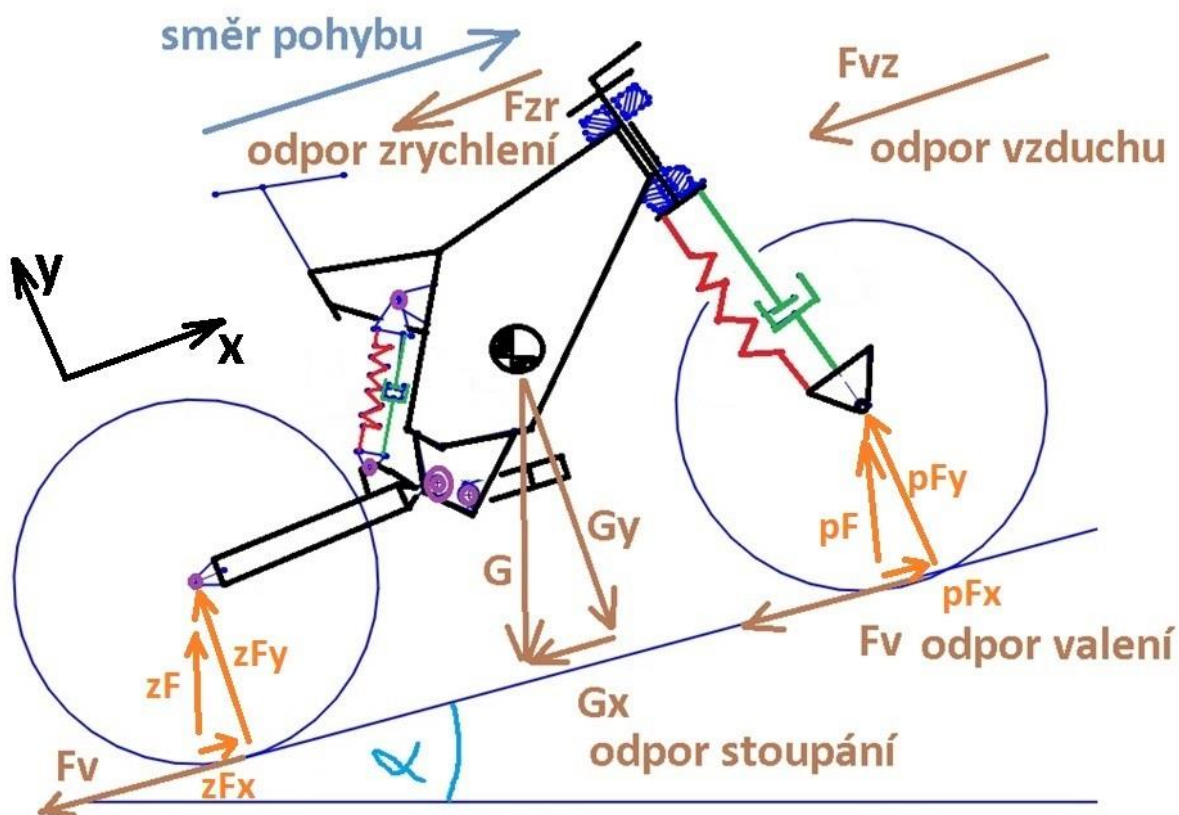
Další novinkou oproti ostatním starším typům je zadní variabilní rekuperační brzda, která veškerou bržděnou energii vrací zpět do baterie. Na posledním modelu kola byla mechanická zadní brzda pro jízdu v terénu kompletně vynechána, aby co největší množství energie bylo vráceno zpět do akumulátoru. Při nízkých otáčkách se ztrácí brzdný účinek vlivem účinnosti motoru. Tím pádem se brzdí protiproudem, tedy vzniká opačný moment než při jízdě vpřed a nebo je možné dobrzdit přední mechanickou brzdou. Nová je na tomto modelu také stavba baterie. Jedná se o hliníkový obal, ve kterém je uložena spolu s teplotními čidly, rozmístěnými všude po bateriích tak, aby kontrolovaly, jestli nedochází k přehřívání baterie vlivem nabíjení nebo vybíjení, případně vlivem poruchy. Tento model se dále pyšní velice pevnou a lehkou zadní vidlicí z hliníkové slitiny

5. JÍZDNÍ ODPORY A ZTRÁTY

Jízdní odpory jsou známé a často diskutované téma, které nelze jednoduše přehlédnout. Velice úzce souvisí s předmětem této práce a je možné říci, že od nich se odvíjejí veškerá měření a výsledky. V následujících podkapitolách budou rozebrány jednotlivé jízdní odpory obecně a poté podrobněji problematika, se kterou jsem se potýkal při jejich zjišťování. Odpory přímo souvisejí s energetickými ztrátami, které ovlivňují pohyb všeho, co je poháněno nějakou silou. Dokonce i při chůzi proti větru se potýkáme s odporem, který ovlivňuje námi vydané množství energie na ušlou vzdálenost. S vozidly je to stejné. Některé z těchto odporů je možné přímo ovlivňovat a jiné nikoliv. Například odpor vzduchu, valení a akcelerace je možné z velké části ovlivnit. Ať už je to nahuštěním pneumatik, volbou terénu, sešlápnutím akceleračního pedálu nebo volbou tvaru konstrukce vozidla, je možné nějak tyto typy odporů ovlivnit. Odpor, který nelze ovlivnit, je odpor tvaru vozovky. Pokud vozovka vede přes kopec a není možné volit jinou trasu, bude nutné počítat s odporem ze stoupání. Jediný odpor, který v této práci nebude zmíněn, je odpor tahu připojeného vozidla, který s mou prací nesouvisí.

5.1 Schéma kola

Obrázek ukazuje a znázorňuje vnější síly neboli odpory, které na kolo Adventure působí. Způsob, jak s nimi počítat a pracovat, bude rozebrán dále v práci. Schéma představuje pohyb kola ve svahu se základními parametry



Obr. 32: Schéma působení vnějších sil na kolo při jízdě

Směr pohybu může také představovat tažnou sílu. Je důležité vycházet při každém určení z obecně platné rovnováhy sil. Rovnováha sil je určena z předchozího obrázku a platí obdobně pro

všechna vozidla. Rozdíl může být v počtu náprav a kol, dále může být rozdíl ve stanovení tažné síly, ale obecně bude tažná síla rozebrána níže. Platí to i v tomto případě.

Rovnováhu sil ve směru osy x je možné zapsat:

$$F_{taž} = F_{vz} + F_{zr} + F_v + F_s + G_x - zF_x - pF_x [N] \quad (2.)$$

Rovnováhu sil ve směru osy y je možné zapsat:

$$0 = zF_y + pF_y - G_y [N] \quad (3.)$$

Tažná síla je síla, která obecně vychází z nějakého motoru a je jedno, jestli je spalovací nebo elektro a přechází přes převodové ústrojí nebo jeden převod na kola vozidla. Na tato kola přenáší krouticí moment, přes který je možné spolu s poloměrem kol určit hnací sílu na kolech.

Hnací moment na kolech nebo kole je dán vztahem:

$$M_K = M_{EM} * i_{PÚ} * \eta_{PÚ} [Nm] \quad (4.)$$

Poté hnací síla na kole vychází z hnacího momentu na kole a spolu s dynamickým poloměrem kola se stanoví jako:

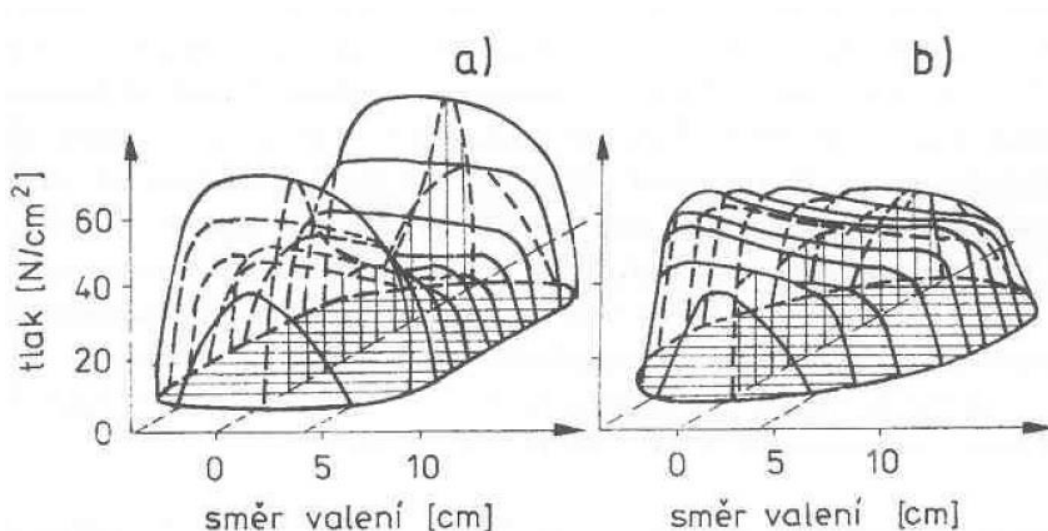
$$F_{Ki} = \frac{M_{Ki}}{r_d} [N] \quad (5.)$$

5.2 Jízdní odpory

Všechny jízdní odpory již byly představeny na schématu kola a budou podrobněji rozebrány dále. Každopádně je možné na ně nahlížet jako na síly, které obecně brání pohybu vozidla a definují se za určitých podmínek a stavů. Obecně je možné říci, že se jedná o jednoduché zákony zachování energie, případně zákony akce a reakce a nedají se razantně omezit nebo ovlivnit. Avšak správně navržené dílčí komponenty mohou vést ke stavu, který tyto odpory minimalizuje. Například tvarem a složením pneumatiky je výrobce schopen vylepšit odvalování pneumatiky po vozovce a tím pádem vylepšit jízdu a snížit energetické ztráty.

5.2.1 Odpor valení

Odpor valení je možné chápat jako důsledek deformace pneumatiky při styku kol s tuhou podložkou. Stykem kola s podložkou se tvoří plocha nazvaná stopa. V přední části stopy dochází ke stlačování pláště, v zadní části nastává návrat pláště do kruhového tvaru. Na dalším obrázku je možné vidět měrné síly působící v plášti právě v oblasti stopy.



Graf 4: Měrné síly v plášti v oblasti deformace a) diagonální pneumatika b) radiální pneumatika [26]

Měrné tlaky v přední části stopy pneumatiky jsou vyšší než v části zadní. Tímto dochází k tomu, že je reakční síla zF_y a pF_y od vozovky předsunutá před svislou osu kola o vzdálenost ramena e . Reakce od vozovky je stejně velká, a proto zde působí moment proti otáčení. Tento moment je možné spočítat jako:

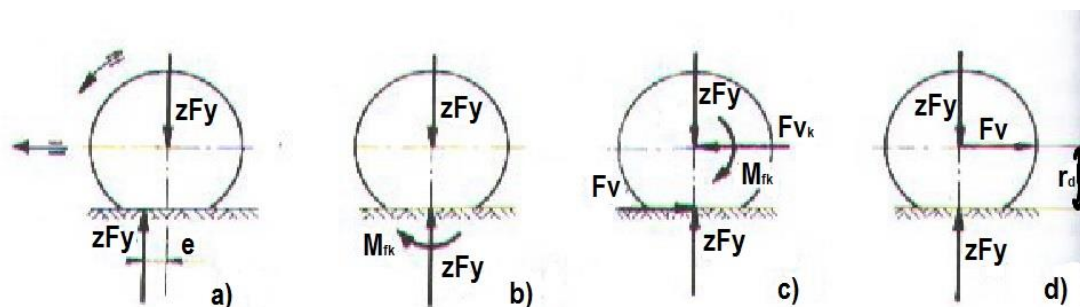
$$M_{fk} = zF_y * e + pF_y * e = F_v * r_d [Nm] \quad (6.)$$

Reakční sílu zF_y a pF_y je možné posunout do svislé osy, pokud je zaveden pomocný moment M_{fk} , který vyvolává vodorovnou reakci F_v . Tato vodorovná reakce směřuje proti pohybu kola a nazývá se **valivý odpor**.

$$F_v = (zF_y + pF_y) * \frac{e}{r_d} = (zF_y + pF_y) * f [N] \quad (7.)$$

$$f = \frac{e}{r_d} [-] \quad (8.)$$

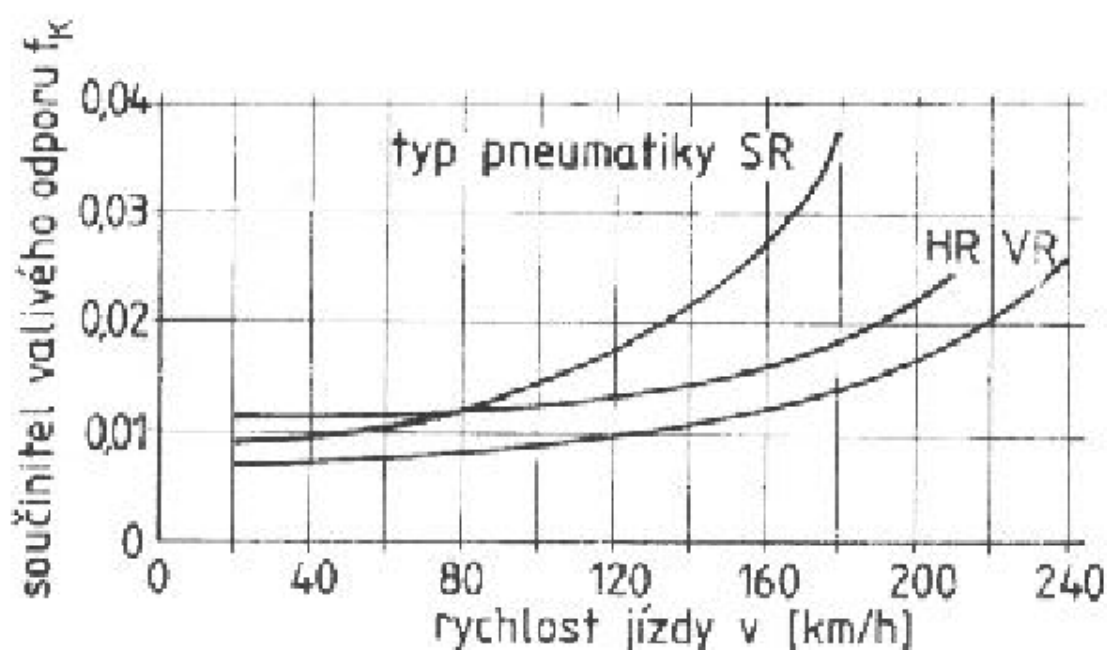
Kde f je součinitel valivého odporu kola. Účinek valivého odporu kola lze vyjádřit také jednoduchým silovým schématem. Dynamický valivý poloměr kola se značí r_d a jedná se o poloměr kola při jízdě tedy při odvalování. Liší se od běžného poloměru a také od statického poloměru pneumatiky.[26]



Obr. 33: Moment valivého odporu kola M_{fk} a valivý odpor kola F_v na volně se valícím kole [26]

a) vodorovná reakce tvoří moment b) posunutí reakce do středu a nahrazení momentem c) moment M_{fk} vyvolá reakci F_v , která směřuje proti pohybu kola, tedy ve středu musí působit vodorovná dvojice, aby vznikla rovnováha d) vzniká ve středu rotace kola reakce F_v neboli valivý odpor na dynamickém poloměru kola r_d

Součinitel valivého odporu f však převážně závisí na dvou hlavních faktorech. Prvním faktorem je povrch vozovky. Je velký rozdíl mezi jízdou po silnici a jízdou po polní cestě. Druhým a posledním faktorem je nahuštění pneumatik. To hraje důležitou roli, protože při menším tlaku v pneumatice dochází k přílišné deformaci a tím pádem vzrůstají deformační práce a současně s nimi stoupá i tlumící práce, která zvyšuje valivý odpor. Může se také stát, že při vyšších rychlostech pneumatika nestíhá v poměrně krátkém čase vyrovnávat deformaci, která vzniká na stopě. Následkem toho se svislá reakce od vozovky posouvá více dopředu vlivem menšího měrného tlaku na zadní části stopy a tím se výsledný odpor ještě dál zvětšuje. Toto se děje při vysoké rychlosti, kde spolu s deformací podhuštěné pneumatiky ještě souvisí další deformace a tou je rozkmitání oběžné plochy u bočních stěn pneumatiky. To se však děje pouze při vyšších rychlostech. Do rychlosti okolo **80km/h** nemá u běžného automobilu rychlost vliv na odpor valení a chová se víceméně konstantně. Lépe chování charakterizuje následující obrázek, kde je znázorněna závislost valivého odporu na rychlosti. [26]



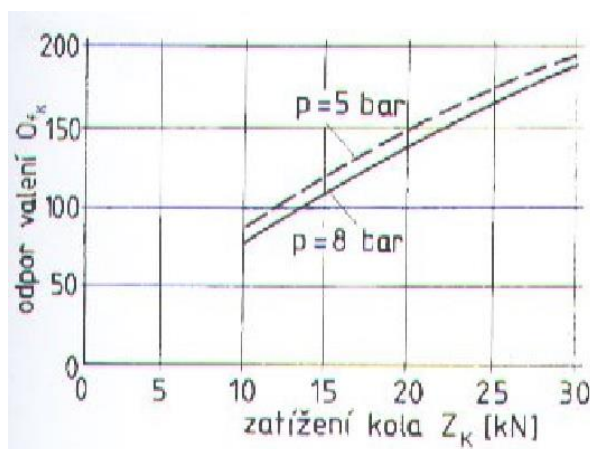
Graf 5: Vliv pneumatiky na součinitel valivého odporu [26]

Tento graf platí pro osobní automobil, ale pro pneumatiky kola bude platit velmi podobná situace. Určité typ pneumatiky bude hrát svoji roli na odvalování v terénu nebo po vozovce.

Pro jízdu na kole do stoupání je třeba počítat ještě s úhlem stoupání a základní rovnice by se změnila následujícím způsobem:

$$F_v = (zF_y + pF_y) * f * \cos\alpha [N] \quad (9.)$$

Důležitým faktorem, jak už bylo zmíněno, je také huštění pneumatik a je charakterizováno podle následujícího grafu. Před každým měřením valivého odporu na kole Adventure byl zajištěn a přeměřen tlak v pneumatikách tak, aby nedošlo k nekorespondujícímu načítání hodnot.



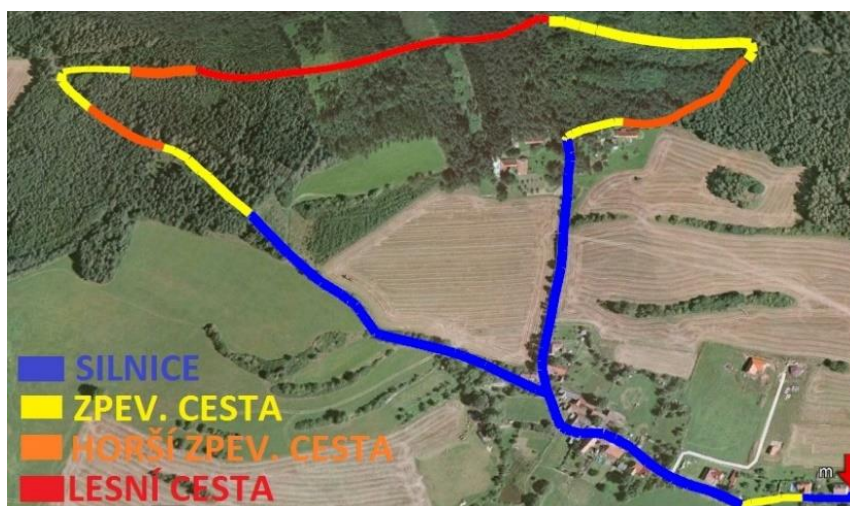
Graf 6: Vliv nahuštění pneumatiky na odporu valení [26]
Z grafu je patrné, že čím je pneumatika více nahuštěna, tím více klesá valivý odpor.

Při měření valivého odporu na kole Adventure docházelo často k problémům. Z vlastní zkušenosti dnes mohu říci, že vše zabere více úsilí a času, než se zdá na začátku. Měření valivého odporu bylo jedno z nejobtížnějších měření. Až při samotném naměřování a počítání konkrétní hodnoty součinitele pro daný povrch, jsem si uvědomil, jak jednoduché jsou výpočty, pokud jsou hodnoty součinitele předem zadány. Celkově se jedná o jednoduché závislosti, vzorce a výpočty, pokud člověk má správné hodnoty.

Celý přístup byl následující. Na zvolené trati byly vytyčeny celkem čtyři úseky, kde se trať měnila z pohledu odporu povrchu. Byli rozděleny na:

- a) silnice
- b) zpevněná cesta
- c) horší zpevněná cesta
- d) lesní cesta

Barevné rozdělení je možné vidět na následujícím obrázku. K tomuto obrázku se dále vrátím v budoucí **kapitole 6.1** a bude zde podrobněji rozpracován.



Obr. 34: Charakteristická trať s rozdělením povrchů z hlediska odporu

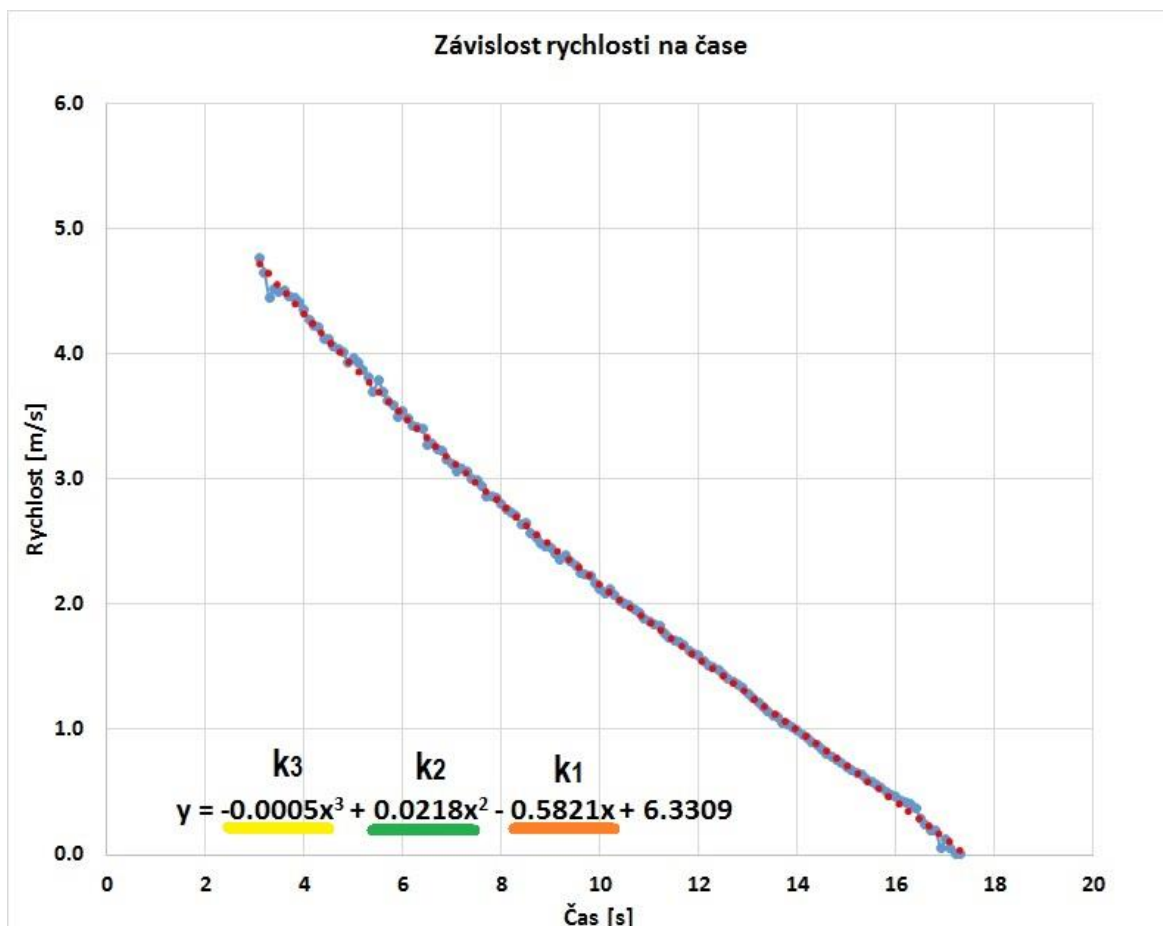
Kompletní měření celé trati proběhlo celkem čtyřikrát a měření vybraných úseků proběhlo minimálně třikrát a maximálně osmkrát z každého typu povrchu. Z důvodu minimalizace chyb měření jsem často úsek přeměřoval ještě na jiném podobném místě, které však nebylo bráno v úvahu do finálních výsledků, sloužilo pouze k porovnání a k zamezení nesprávným závěrům. Poslední a předposlední měření se nejvíce shodovala i v různém přístupu k měření, a proto je považováno výsledné měření za korektní. Je ale nutné brát v potaz terén a z něj vyplývající rozptyl hodnot, kterému se nelze vyhnout. Problém při daných měření byl ten, že pokud se měřil vybraný úsek několikrát za sebou v obou směrech kvůli minimalizování chyby ze stoupání případně klesání, nikdy nebylo dosaženo stejných výsledků. Vždy došlo aspoň k minimálnímu odlišení.

Pokud jde o dojezdovou zkoušku, důvodem odlišností může být špatné kopírování stopy, jiný pohyb těla na kole nebo problém s udržení stability při velmi nízké rychlosti. Díky všem těmto vlivům, které budou ještě jednou opakovány při porovnávání výsledků, bylo při měření potřeba počítat s chybou a odlišností. Měřilo se tedy ze dvou přístupů. První přístup vycházel z normy o dojezdové zkoušce. Kolo se rozjelo na rychlost okolo **15-20 km/h** na vybraném úseku, ne však více, aby se minimalizovala chyba od odporu vzduchu a měřil se čas, otáčky, energie a příkon až do doby, kdy došlo k zastavení. Poté pomocí vzorců vycházející z normy bylo možné dopočítat součinitel odporu valení. Jak velké ovlivnění se děje odporem vzduchu při **15-20 km/h** bude zpětně přepočítáno v kapitole o odporu vzduchu. Celý postup vypadal následovně:

ČAS [s]	PŘÍKON [W]	OTÁČKY [erpm]	ENERGIE [J]	Rychlost [m/s]	Rychlost [km/h]	Přírutek dráha [m]	Druhá mocnina rychlosti	Zrychlení [m/s ²]	Absolutní hodnota zrychlení [m/s ²]
3.1	1512.87	2386.9	2656.2	4.76	17.15	0.48	22.703	0	0
3.2	1534.67	2324.9	2808.5	4.64	16.71	0.46	21.539	-0.46	0.458
3.3	1563.14	2226.8	2967.7	4.45	16.00	0.44	19.760	-0.45	0.455
3.4	1618.02	2263.5	3127.9	4.52	16.27	0.45	20.415	-0.45	0.451
3.5	1664.94	2248.8	3292.8	4.49	16.16	0.45	20.151	-0.45	0.448
3.6	0.00	2256.6	3320.2	4.50	16.22	0.45	20.291	-0.44	0.445
3.7	0.00	2232.4	3320.2	4.46	16.04	0.45	19.860	-0.44	0.441
3.8	0.00	2229.9	3320.2	4.45	16.02	0.45	19.815	-0.44	0.438

Tab. 4: Část naměřených dat z dojezdové zkoušky na asfaltovém povrchu

Tabulka představuje část souboru naměřených dat z dojezdové zkoušky na asfaltovém povrchu. Bylo důležité si upravit data jako rychlost, druhá mocnina rychlosti a absolutní hodnotu ze zrychlení nebo v tomto případě zpomalení. Jako první krok bylo nutné si udělat průběh rychlosti na čase. Výše prezentovaná data jsou promítnutá do následujícího grafu. Po proložení polynomicou spojnici třetího stupně je k dispozici rovnice charakterizující pokles rychlosti.



Graf 7: Závislost rychlosti na čase při měření na asfaltovém povrchu

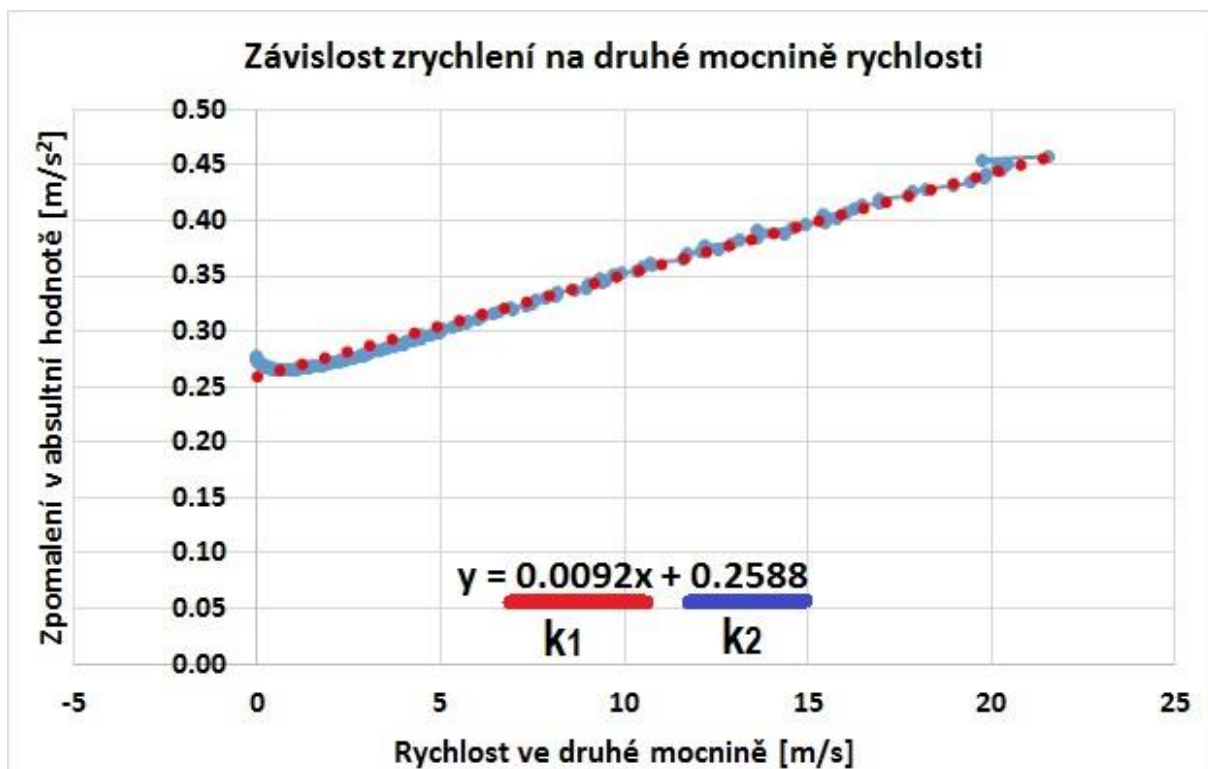
Tato rovnice vychází ze zápisu:

$$\frac{dv}{dt} = a = 3 * k_3 * t^2 + 2 * k_2 * t + k_1 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (10.)$$

Pro tento konkrétní polynom by po úpravě rovnice měla tento tvar:

$$a = -3 * 0,0005 * x^2 + 2 * 0,02178 * x - 0,5821 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (11.)$$

Pro jednotlivé časové okamžiky dojde k napočítání složek zrychlení/zpomalení a je možné přikročit k dalšímu kroku. Tedy je nutné v tuto chvíli udělat graf závislosti absolutní hodnoty napočítaného zpomalení na druhé mocnině rychlosti. Graf pro tento případ vypadá takto:



Graf 8: Závislost zrychlení na druhé mocnině rychlosti proložen lineární přímkou

Při proložení tohoto grafu lineární přímkou dostaneme rovnici této přímky. Nyní přejdeme k poslednímu kroku. Důležité je použít rovnici o dojezdové zkoušce a z té vyjít k dalším výpočtům. Rovnici lze zapsat v následujícím tvaru:

$$F_{zr} = F_V + F_{vz} + F_s \text{ [N]}$$

odpor od zrychlení

odpor valení známe

odpor vzduchu

odpor stoupání

$m \cdot a \cdot \delta = m \cdot g \cdot f + \frac{1}{2} S_x c_x \rho v^2$

základní rovnice dojezdové zkoušky

neuvažujeme (jízda po rovině)

Obr. 35: Rozbor a skladba rovnice dojezdové zkoušky

Pro další výpočty se použije rozepsaná rovnice dojezdové zkoušky a upraví se do tvaru, ze kterého je možné napočítat jednak součinitel odporu valení na daném povrchu a je možné použít druhou část k napočítání součinitele odporu aerodynamického odporu. Tento postup již nebude znovu vysvětlován v **kapitole o odporu vzduchu**, se kterou souvisí, protože princip je stejný a postup je vidět zde. Tento postup určení součinitele odporu valení byl využit pouze při měření na silnici. Jak již bylo řečeno, byly zde určité komplikace, z nichž největší byla udržení stability při dojezdu kola při nízké rychlosti v terénu.

$$m \cdot a \cdot \delta = m \cdot g \cdot f + \frac{1}{2} S_x c_x \rho v^2$$

$$y = k_1 \cdot x + k_2$$

$$a = \frac{\rho \cdot S_x \cdot c_x}{2 \cdot m \cdot \delta} \cdot v^2 + \frac{f \cdot g}{\delta}$$

součinitel rotačních hmot

$$k_1 \rightarrow c_x = \frac{2 \cdot k_1 \cdot \delta \cdot m}{\rho \cdot S_x}$$

$$k_2 \rightarrow f = \frac{k_2 \cdot \delta}{g}$$

Obr. 36: Ukázka postupu určení součinitele odporu valení a ze stejného výpočtu součinitele odporu vzduchu

Druhý přístup bylo měření při konstantní rychlosti a byl využit na většinu dalších měření. Díky naprogramování firmwaru jednotky na míru došlo k upravení stálých a neměnných otáček motoru na rychlost **15 km/h**. Tedy při měření jsem mohl držet plný plyn a kolo jelo pouze **15 km/h** a mohl jsem se tak lépe soustředit na terén, kopírování stopy a pohyby těla. Pomocí energie, která prošla přes jednotku, došlo k napočítávání spotřebované energie. Tedy kolik energie odejde z baterie do řídicí jednotky. Při ustáleném odběru energie, opět měřeno v obou směrech, se následně dopočítal součinitel odporu valení ze spotřebované energie. Při každém měření byla zaznamenána i ujetá vzdálenost. Pomocí ní a jednoduchého vzorce byla určena síla, která byla dále použita už k samotnému výpočtu součinitele odporu valení. Pro výpočet byly použité následující vzorce:

$$W = F \cdot s \text{ [J]} \text{ z toho } F = \frac{W}{s} \text{ [N]} \text{ energie a dráhy byly měřené veličiny} \quad (12.)$$

Při známé hmotnosti kola a jezdce a s uvažováním tíhového zrychlení **$g=9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$** vychází následující úprava

$$F_v = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha \text{ [N]} \text{ dále platí } F = F_v \quad (13.)$$

Potom tedy po úpravě s uvažováním jízdy po rovině je k dispozici následující tvar:

$$f = \frac{F}{m \cdot g} [-] \quad (14.)$$

V reálném použití princip a postup prezentuje následující tabulka úseku zaznamenaných dat. Celkově měření touto metodou bylo daleko rychlejší na zpracování. Opakovatelnost měření byla přesnější než u dojezdové zkoušky, proto byla tato metoda jediná použita u měření povrchů v terénu. Silnice byla naměřena oběma způsoby a výsledky součinitelů budou prezentovány na dalších stranách.

Energie [J]	Přikon [W]	Otáčky [erpm]	Přírutek energie [J]	Rychlost [m/s]	Přírutek dráhy[m]
7703.5068	159.3	1965.1	15.42	3.92	0.39
7720.9014	174.8	1955.8	17.39	3.90	0.39
7740.5806	210.2	1936.3	19.68	3.87	0.39
7759.561	197.4	1913.8	18.98	3.82	0.38
7777.0469	143.7	1956.3	17.49	3.91	0.39
			18.57	187.2	0.39
			F - síla	m - celk.	g - tíh zr.
			47.80	147	9.81
			f - souč. odpo. val.	0.033	

$F = W / s \text{ [N]}$
 $F = m * g * f \text{ [N]}$
 $f = (m * g) / F$

Tab. 5: Část naměřených dat a postup výpočtu součinitele odporu valení pro povrch silnice

Nejlépe a nejpřesněji se měřila silnice. Na stálém povrchu bylo snadnější kopírovat stopu, jezdec nebyl rozhazován nerovností terénu ani dalšími vlivy. Nebyl tedy problém s určením odporu valení, a přesto se hodnoty při opakovaném měření značně lišily. Pro představu výsledky součinitelů odporů při měření dojezdovou zkouškou vypadají takto:

X	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4
Součinitel odporu valení	0,03	0,036	0,026	0,044

Měření pomocí energetické metody výsledky:

X	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4
Součinitel odporu valení	0,032	0,037	0,036	0,026

Při zprůměrování všech těchto výsledků vychází hodnota součinitele odporu valení **$f=0.033$** .



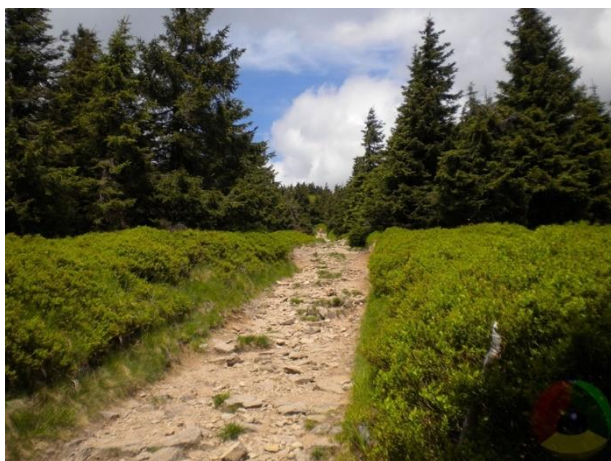
Obr. 37: Zobrazení úseku silnice na charakteristické trase

Dalším povrchem, který byl poměrně snadný odměřit, byla zpevněná cesta. Většina měření byla přeměřována v létě 2017 a díky stálosti počasí působily měřené povrchy pevným a stálým dojmem bez borcení terénu pod kolem. V **kapitole 7. Citlivostní analýza** bude přihlédnuto i na situace, kdy z pohledu odporu valení nebude povrch tak přívětivý, jako tomu bylo v létě. Hodnota odporu valení na zpevněné cestě byla **$f=0.061$** .



Obr. 38: Zobrazení úseku zpevněné cesty na charakteristické trase

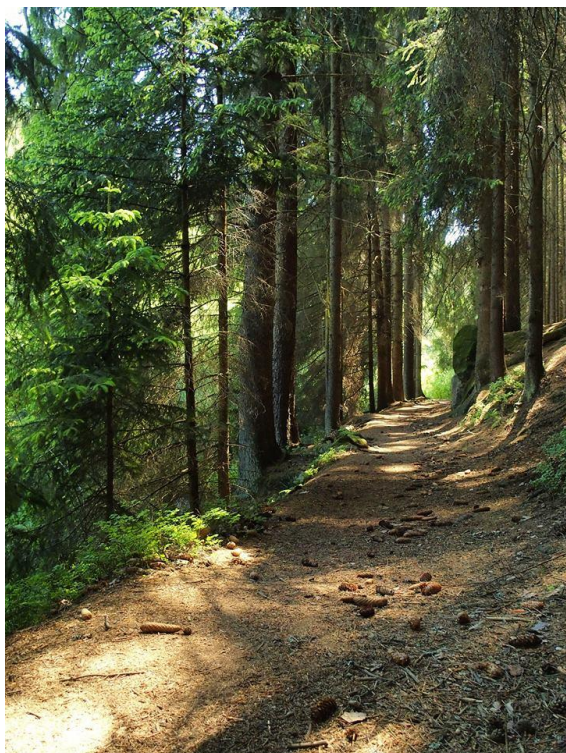
Dalším povrchem je horší zpevněná cesta. Jedná se o terén klasické zpevněné cesty, ale s velkým množstvím kamenů. Zde bylo velmi komplikované měření. Díky nerovnosti terénu docházelo opakovaně k výpadku USB kabelu a ztrátě části dat. Proto jsem měření musel často opakovat. Nakonec se celkově typ horší zpevněná cesta přeměřoval znovu po prodloužení komunikačního kabelu v jiné době. Jak vypadal jeden úsek horší zpevněné trati, je možné vidět na následujícím obrázku. Na úseku na obrázku však nebyl měřen odpor valení z důvodu prudkého stoupání a byl zvolen podobný, ale rovinný úsek z charakteristické trati. V této části vycházel odpor valení **$f=0.077$** .



Obr. 39: Zobrazení úseku horší zpevněné cesty na charakteristické trase

Posledním testovaným a měřeným úsekem je lesní cesta. Zde měření probíhalo velice příjemně a nebyl větší problém s odměřením. V jedné části, byl trochu nepříjemný terén s vyššími kořeny, které měly tendenci kolo i jezdce rozhazovat. Na lesní cestě vyšla k mému překvapení hodnota $f=0.069$, i když jsem předpokládal, že bude vyšší oproti horší zpevněné cestě. Část měřeného úseku je vidět na následujícím obrázku. Hodnoty, které vyšly z jednotlivých měření, vypadají takto:

X	Měření 1	Měření 2	Měření 3
Součinitel odporu valení	0,0636	0,0652	0,0771



Obr. 40: Zobrazení úseku lesní cesty na charakteristické trase



Obr. 41: Probíhající měření uprostřed lesa a ukládání hodnot. Graf s měřenými veličinami jako byl proud, napětí, příkon, otáčky motoru a další

Závěrem bych chtěl říci, že jsem byl překvapen, že výsledky vychází vzájemně velmi podobně a není mezi nimi velký rozdíl. Důvodem zřejmě bylo, že cesta působila v době měření velice pevným dojmem. Určitě by bylo dobré vědět, jak by se hodnoty měnily za mokra a za deště, ale na tato měření už nebylo kolo k dispozici a nebylo možné nové měření. Rekapitulační tabulka všech odporů valení na charakteristické trase:

x	Silnice	Zpevněná cesta	Horší zpevněná cesta	Lesní cesta
Součinitel odporu valení	0.033	0.061	0.077	0.069

Tab. 6: Přehled součinitele valení na jednotlivých částech trasy

V této kapitole se na začátku mluví o dynamickém poloměru a bylo by dobré ještě říci, jaký dynamický poloměr byl použit pro výpočty v této práci. Jelikož by bylo komplikované si správně stanovit dynamický poloměr, byl změřen poloměr statický při zatížení jezdce a s touto hodnotou se dále pracovalo v práci. Hodnota poloměru je $r_d=0,305\text{ m}$. Měřilo se klasickým svinovacím metrem na tvrdém asfaltovém podkladu.

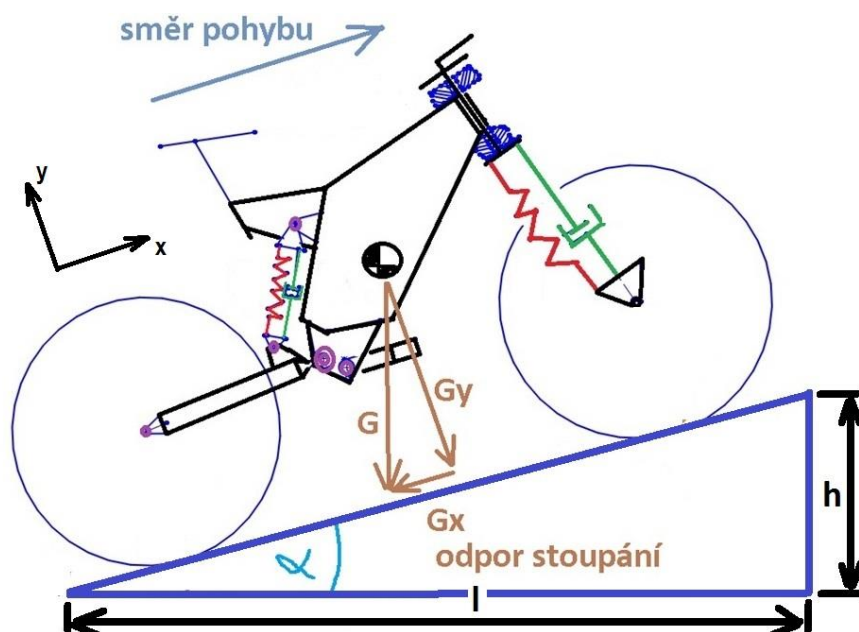
5.2.2 Odpor stoupání

Odpor stoupání vzniká při jízdě vozidla na podélném svahu. Tento odpor může nabývat záporných hodnot při jízdě vozidla z kopce, tím pomáhá tažné síle, nebo kladných hodnot při jízdě do kopce a tím působí proti tažné síle. Dimenzování motoru a převodovek bývá právě pro pohon do stoupání. Zpravidla se tento odpor do stoupání stává dominantní před ostatními. Jeho velikost se určuje ze sinové složky tíhy vozidla respektive jeho váhy i s posádkou nebo jezdcem, pokud se vše směřuje ke kolu. Kde G je tíha působící v těžišti kolmo k zemi a úhel α svírá vodorovnou rovinu s rovinou vozovky. Velikost stoupání je dána vztahem:

$$F_S = \pm G * \sin \alpha = m * g * \sin \alpha [N] \quad (15.)$$

Obvykle se stoupání zadává ve stupních a je poté dopočítáno přes tangentu z následujícího trojúhelníku. Platí, že stoupání $s = 5 \%$ je vzdálenost **5 metrů** výšky na **100 metrech** délky tedy podle trojúhelníka platí:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{l} \text{ z toho vyplývá } \alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{h}{l} \right) [^\circ] \quad (16.)$$



Obr. 42: Vznik a představení odporu stoupání

Důležité je také říci, že se často pro malé úhly respektive malá stoupání dá brát v úvahu, že $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$. Potom tedy můžeme brát v úvahu pouze zjednodušený tvar vzorce a to, že hodnota stoupání se rovná i jejímu úhlu. Toto platí pouze do určitého stoupání zhruba do **10%**. Důležité je také zmínit, v čem se stoupání s dosazuje. Platí, že pokud se stoupání rovná **10%**, potom $s=0,1$.

$$F_S = \pm G * s = m * g * s [N] \quad (17.)$$

Tento vztah lze používat ve většině výpočtů, protože běžné cesty se pohybují okolo **10-12%** maximálně. Výjimkou mohou být vysokohorské silnice. Jak už bylo řečeno, pokud dojde na odpor stoupání, bývá dominantní oproti ostatním. V celkovém součtu po nějaké trase ale tento odpor nemusí

vždy patřit mezi dominantní. Jelikož nabývá jak kladných tak záporných hodnot, tak oproti například odporu valení, může pomáhat vozidlu v jízdě z kopce.

Co se týká zpracování výškového profilu charakteristické trasy, vše probíhalo následujícím způsobem. Na obrázku níže je vidět červený obrys charakteristické trasy, která byla zpracována přes software Google Earth. Pomocí tohoto programu byl zpracován výškový profil na charakteristické trati. Výškový profil trasy byl zpracován vzhledem ke vzorkovací periodě, která byla **100ms** tedy **0,1 vteřiny**. Cesta byla rozdělena na dílčí úseky v řádu několika centimetrů, které na sebe volně navazovaly ve svých koncových a počátečních bodech. Dále u těchto úseků bylo stanoveno, jestli se jedná o stoupání případně klesání. Pomocí přírůstku dráhy neboli přepon trojúhelníků, který byl napočítán pro každý časový údaj z rychlosti motoru, se dopočítal úhel jízdy do kopce nebo z kopce. Jednoduše řečeno, výškový profil celé trati byl pospojován malými úsečkami tak, aby ho přesně kopíroval. Jelikož v mém případě cesta začíná a končí na stejném místě, sloužilo zpracování výškového profilu spolu s naměřenými hodnotami pouze jako ověření správnosti postupu a dílčích výpočtů. Energetická náročnost v konečném součtu vycházela téměř nulová, až na malou nepřesnost zpracování výškového profilu. Tedy potenciální energie, kterou bylo nutné vydat navíc pro jízdu do kopce, se vrátila zpět při jízdě zpět z kopce dolů.



Obr. 43: Charakteristická trasa spolu s výškovým profilem

5.2.3 Odpor akcelerace

Odpor akcelerace může nabývat opět jak kladných tak záporných hodnot. Při každé změně rychlosti působí na vozidlo nebo kolo setrvačné síly, které právě představují odpor ze zrychlení nebo zpomalení při brždění. Obecně se tento odpor skládá ze dvou hlavních složek. První složka jsou odporové síly setrvačné posuvných hmot a druhá složka jsou odporové síly hmot rotačních. Vše je dáno vztahem:

$$F_{Zr} = F_{pos} + F_{rot} [N] \quad (18.)$$

Odpor ze zrychlení posuvné části a z rotujících je znázorněný následujícími rovnicemi:

$$F_{pos} = m * a [N] \text{ a } F_{rot} = \frac{J_r * \varepsilon}{r_d} [N] \quad (19.)$$

Odpor akcelerace je závislý na momentech setrvačnosti jednotlivých částí stroje. Důvodem je dvojitý pohyb těchto těles. Tedy vše, co je potřeba roztočit, vykonává pohyb rotační a navíc se ještě tyto hmoty posouvají. K tomu, aby byl odpor co nejmenší při požadavku vysoké akcelerace, je důležité mít momenty setrvačnosti co nejmenší. Obecně se moment setrvačnosti J_r rotačních částí vozidla skládá z dalších dílčích momentů. Částí pohonu může být například elektromotor se svým momentem setrvačnosti J_{rm} . Pokud je pohon vybaven převodovkou, je důležité počítat také s momenty setrvačnosti převodovky J_{rp} . Posledním momentem v tomto obecném uspořádání je moment setrvačnosti, který je třeba překonat ke zrychlení kol vozidla.

$$J_r = J_{rm} + J_{rp} + J_{rk} [kg \cdot m^2] \quad (20.)$$

$$M_k = J_{rm} \cdot \varepsilon_1 + J_{rp} \cdot \varepsilon_2 + J_{rk} \cdot \varepsilon_3 [Nm] \quad (21.)$$

Pro případ mého kola bez převodového ústrojí by situace vypadala následujícím způsobem:

$$F_{zr} = \left[1 + \frac{J_{zad} + J_{př}}{m \cdot r_d^2} \right] \cdot m \cdot a = \delta \cdot m \cdot a [N] \quad (22.)$$

J_{zad} a $J_{př}$ představují hmotnostní momenty setrvačnosti předního a zadního kola. Tyto momenty setrvačnosti je možné počítat tímto způsobem, protože jejich úhlová zrychlení jsou shodná. Jelikož je v zadním kole i uložený motor, je J_{zad} posčítáno z jednotlivých hmot kola. Důvodem, proč je možné si situaci takto zjednodušit a moment setrvačnosti převodového ústrojí odpadá, je, že převod mezi kolem a motorem je 1:1. Tedy jedna otáčka kola představuje jednu otáčku motoru. Nový symbol delta δ představuje součinitel rotačních hmot. Blíže je představen součinitel rotačních hmot v **kapitole 6.3**.

Odpor ze zrychlení byl zpracován na základě kompletního záznamu z celé trasy a na základě otáček motoru. Pomocí nich byla stanovena rychlost a při stálém neměnném periodicky se opakujícím kroku **0,1 vteřiny** byly napočítány hodnoty zrychlení nebo zpomalení. Jelikož je časový krok velice krátký, uvažoval jsem, že se vše mezi jednotlivými záznamy děje lineárně a tím se přístup velice zjednodušil. Pohled na krátký úsek hodnot, ze kterých se napočítávaly potřebné hodnoty pro určení odporu ze zrychlení.

čas [s]	motor elektrické otáčky [rpm]	Přepočtená hodnota rychlosti [m/s]	Zrychlení	Síla odporu ze zrychlení [N]
1.5	502.892	1.00	0.93	153.62
1.6	575.539	1.15	1.45	238.76
1.7	670.843	1.34	1.90	313.22
1.8	737.838	1.47	1.34	220.19
1.9	804.010	1.60	1.32	217.48
2	887.553	1.77	1.67	274.57
2.1	951.647	1.90	1.28	210.65
2.2	1030.575	2.06	1.58	259.40

Obr. 44: Ukázka části hodnot použitých pro výpočet zrychlení/zpomalení pro dopočítání odporu ze zrychlení

$$F_{zr} = \delta \cdot m \cdot a = 147kg \cdot 1,12 \cdot 1,9 = 313,22[N] \quad (23.)$$

5.2.4 Odpor vzduchu

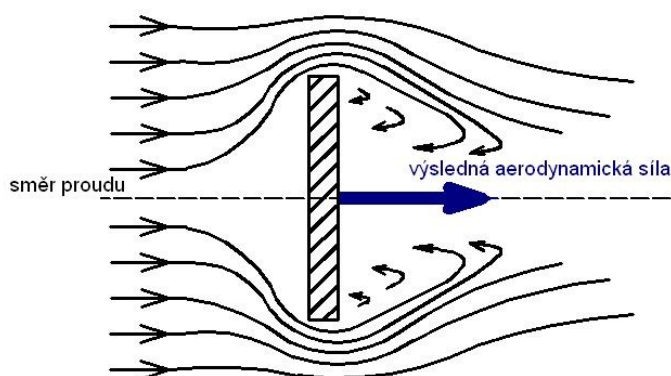
Na závěr jsem si nechal nejzajímavější a na měření nejpracnější odpor vzduchu. Na úvod si dovolím menší obecné povídání o tomto odporu a poté přikročím k hlavní části popisu mého měření. Tento odpor je velice často diskutovaným tématem a hraje obrovskou roli ve většině sportů i motorsportů, ale i v běžných situacích. Týmy inženýrů se stále snaží přizpůsobit tvar karoserie nebo rámu tak, aby tento odpor byl co nejmenší nebo ještě navíc využít sílu větru pro lepší přitlak auta k vozovce ke zlepšení adheze popř. u osobního automobilu ke snížení spotřeby paliva. Co se týká motorsportu, zde se hraje o setiny sekundy a vyhrává vždy ten s nejpokročilejší technologií. Ne jednou tomu se stalo například u formulí, kde tým, který zvládl nejlépe nová pravidla, nové technologie a aerodynamické síly, dominoval většině závodů.

Vzdušný odpor představuje sílu, která směřuje proti pohybu vozidla. Je vyvolaný prostředím, které vozidlo obklopuje a tím mu brání v pohybu. Je důležité pamatovat i na vzdušný odpor, který je kolem nás, aniž bychom se pohybovali. Jedná se o vítr, který může mít velký podíl na celkovém vzdušném odporu. Je velice těžké s ním pracovat v reálném čase, protože je nepravidelný, nemá stálý směr a nemá ani stálou intenzitu. Pokud směřuje proti nám, je důležité jednotlivé rychlosti počítat. Tedy pokud jedeme **60 km/h** a proti nám fouká vítr **20 km/h** musíme do vzorce dosadit rychlost **80 km/h**. Pokud vítr fouká do zad, poté nám naopak pomáhá v pohybu a rychlost větru se odečte od rychlosti pohybu. Vliv na samotnou jízdu má i boční vítr. Například může způsobit ztrátu stability a podobně. Obecně se odpor vzduchu počítá dle následujícího vztahu:

$$F_{vz} = \frac{1}{2} * \rho * S_x * c_x * v^2 [N] \quad (24.)$$

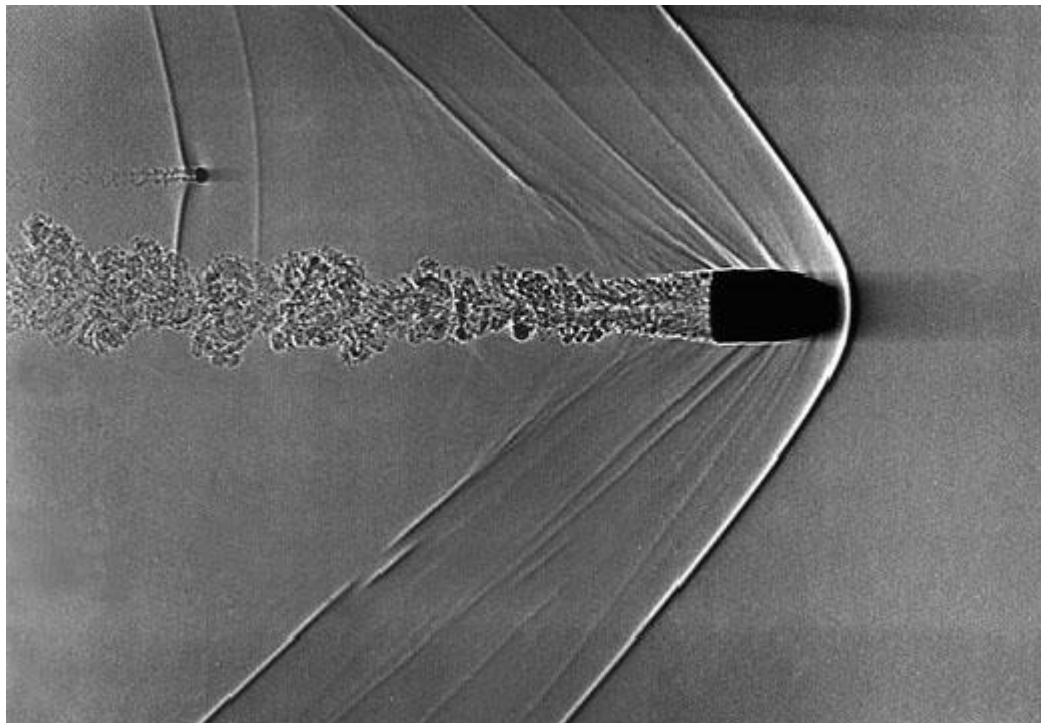
Čelní plocha je prezentována symboly S_x , součinitel odporu vzduchu představuje c_x , hustota vzduchu je prezentována symbolem ρ . Nejvíce zajímavou veličinou u tohoto odporu je rychlost, která je v druhé mocnině. Pro malé rychlosti tento odpor není nijak významný, pokud je čelní plocha a součinitel vzdušného odporu v rozumných hodnotách. Pro moje kolo je potřeba zhruba desetina síly do **13 km/h**, při porovnání s odporem valení na silnici. Při rychlosti **38 km/h** jsou oba odpory rovny vzhledem k povrchu silnice. Tedy nabývá vyšších hodnot daleko dříve, než je tomu například u automobilu. Vše je dáno hodnotou součinitele c_x a čelní plochou S_x .

Jak bylo zmíněno výš, odpor je velmi závislý i na dalších parametrech kromě rychlosti. Je to aerodynamika těles. Některé tvary a tělesa mají obecně lepší odpor a některá menší. Zobrazení proudnic okolo tělesa představuje následující obrázek s rovinou deskou, která stojí v cestě proudění plynu nebo kapaliny. [27]



Obr. 45: Obtékaná deska a směr proudnic se znázorněnými vratnými vířivými proudy díky tvaru desky

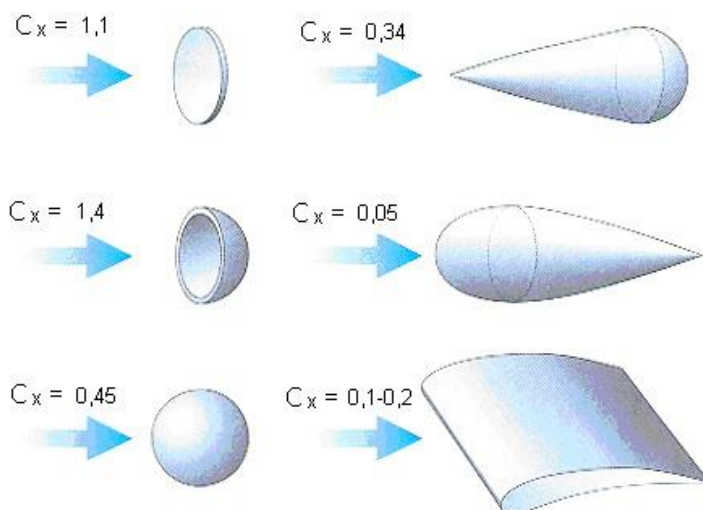
Naopak na dalším velmi zajímavém obrázku je možné vidět daleko větší množství a velikost vířivých proudů pro vystřelenou kulku letící vzduchem. Je krásně zobrazeno, jak kulka rozráží vzduch, a jaké víření za ní vzniká. Mezní vrstvy se díky vysoké rychlosti odtrhávají z povrchu a tím tvoří malé víry za sebou.



Obr. 46: Zachycení kulky při nadzvukovém letu ve vzduchu [27]

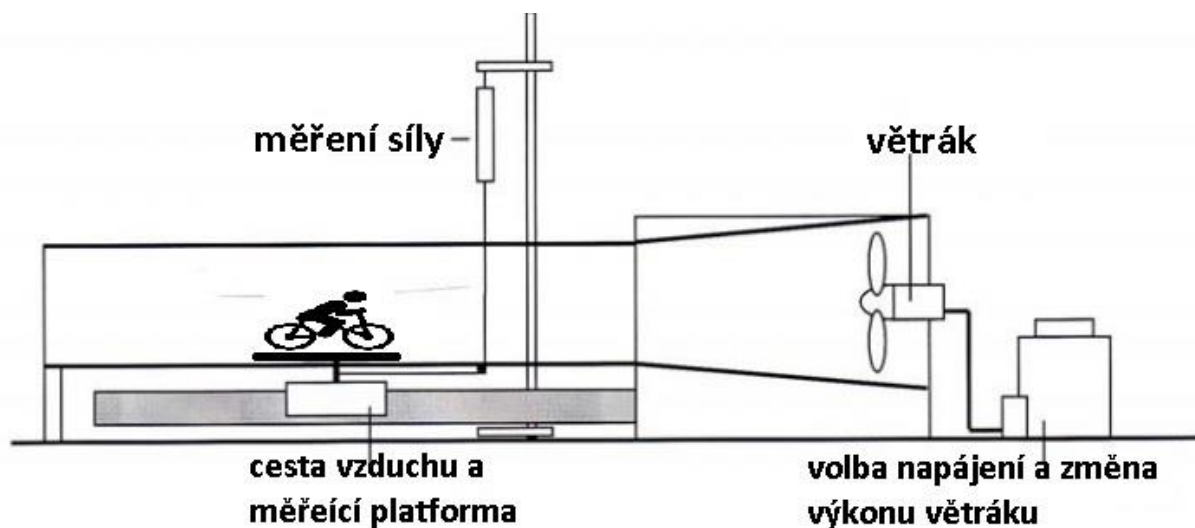
Je dobré si porovnat rovinou desku a kulku. Jejich geometrické tvary a rychlosti jsou rozdílné a to odpovídá tomu, co se děje se vzduchem za nimi. Jsou uváděny schválně tyto dva příklady, protože na nich bude upozorněno na další odlišnosti. Je důležité vnímat tvar a rozlišovat pro něj součinitel odporu vzduchu. Rozlišujeme také, jestli se jedná o proudění laminární nebo turbulentní. To znamená rychlost proudění vzduchu okolo tělesa.

Pro každý běžný tvar je jiný součinitel odporu vzduchu. Následující obrázek představuje nejběžnější tvary, pro které jsou známy a vyřešené součinitele odporu vzduchu c_x .



Obr. 47: Geometrické tvary a jejich čelní součinitele odporu vzduchu – modrá šipka představuje směr proudu vůči pohybu tělesa [28]

Hodnoty čelního součinitele odporu vzduchu jsou nejčastěji měřeny v aerodynamickém tunelu. Tyto tunely slouží k měření finálních produktů případně k měření v průběhu práce na prototypu nebo jednotlivých komponent určitého stroje. Obrovskou roli hrají také v leteckém průmyslu, ale zde se po dlouhá léta drží geometrický tvar křídla zobrazen jako poslední na **obr.43**. Součinitel odporu vzduchu je možné zjistit i pomocí běžného měření, ale v tomto případě není výsledek úplně přesný a můžou v něm být zaneseny odchylky. To vše bude popsáno a vztaženo k mému projektu. Schematicky může vypadat tunel následujícím způsobem:



Obr. 48: Model aerodynamického tunelu pro měření odporu vzduchu [29]

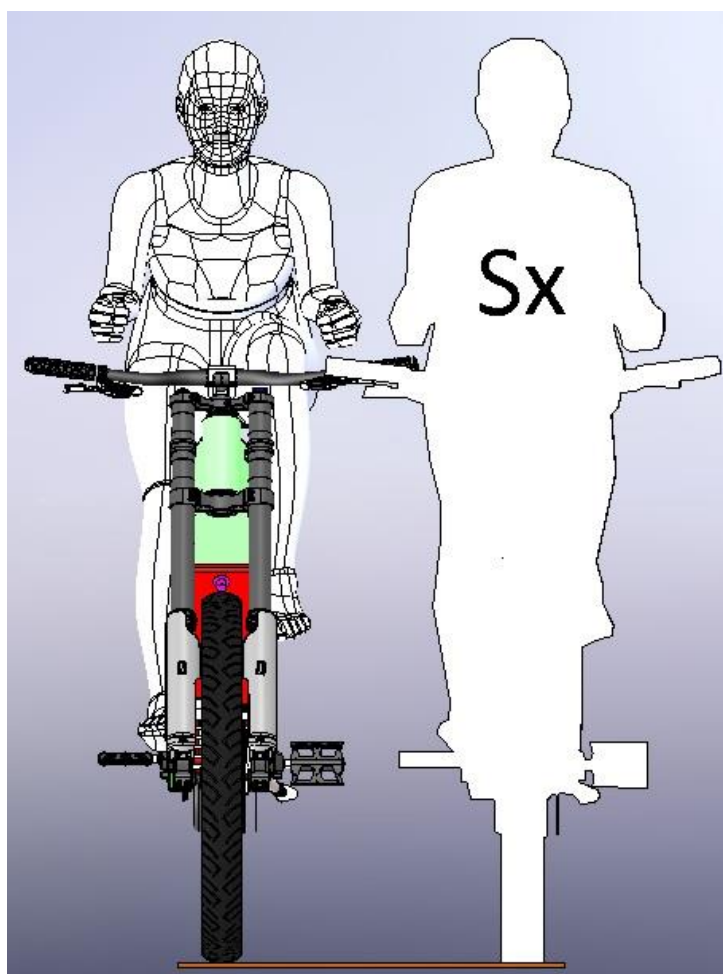
Měření v aerodynamickém tunelu, může mít dvojí charakter. Buďto je stavěn s otevřeným okruhem, kde vzduch odchází z tunelu pryč nebo s uzavřeným okruhem, kde v tunelu proudí dokola stejný vzduch bez větších ztrát kinetické energie nebo tlaku. Slouží k měření aerodynamických vlastností produktů a simulování situací při jejich používání. Tunely jsou dále děleny na nízkorychlostní, zde je rychlost tak nízká, že se nebere v potaz stlačování vzduchu. Naopak u tunelů vysokorychlostních už jsou pozorovatelné vlivy stlačování vzduchu dále podzvukové a nadzvukové. Následující obrázek znázorňuje testování kola v aerodynamickém tunelu.



Graf 9: Testování kola, komponent, oblečení a jezdce v aerodynamickém tunelu [30]

Poslední důležitou informací k doplnění odporu vzduchu je laminární a turbulentní proudění. Je velice znát na výsledném odporu, pokud je proudění turbulentní. Turbulentní proudění má problém s odtrháváním turbulentní mezní vrstvy z povrchu, čímž dochází ke tvorbě úplavu za tělesem. Laminární proudění má výhodu v tom, že mezní vrstva zůstává na tělese a dochází tak k lepšímu tření vrstev po sobě. V ideálním případě se nevytvářejí víry. U kulky zobrazené výš **obr.:42**, docházelo k odtrhávání mezních vrstev z povrchu a vzniku silných vírů za tělesem. Samozřejmě to, co bylo řečeno, platí opět za určitých podmínek.

Nyní bude přistoupeno ke stanovení odporu vzduchu na kole Boxxbike Adventure. Adventure se nevyznačuje aerodynamickými tvary a proto bylo jasné, že součinitel odporu vzduchu bude určitě převyšovat standartní automobil. Prvním důležitým krokem bylo stanovit čelní průmět plochy. Kompletní kolo bylo vymodelováno v softwaru Solidworks. Poté bylo důležité si stanovit parametry běžně oblečeného člověka. Jako vzor jsem si vzal sebe a své rozměry v běžném oblečení. Figurínu jsem použil od jiného autora a s jeho svolením došlo k úpravě základních rozměrů na mojí postavu. Proto je postava maličko nedokonalá tím, že nemá přímo nohy na šlapkách a nedrží přesně řídítka. Postava jede v polopředklonu. Jelikož se při měření nešlape a nedochází tak k ovlivnění součinitele c_x a jelikož by se čelní plocha s rukama na řídítkách změnila o procento, považoval jsem tuto figurínu za dostatečnou pro další výpočty. V příčném řezu se okopíroval obrys kola a figuríny a pomocí modelovacího programu Solidworks došlo k určení čelní plochy. Stanovená plocha činila hodnotu $S_x=0,9907 \text{ m}^2$.



Obr. 49: Charakteristická postava figuríny jedoucí na kole Boxxbike Adventure

Běžný automobil má čelní plochu zhruba $1,6 - 2 \text{ m}^2$, [31] takže v porovnání automobilu s kolem rozdíl není tak veliký. To už napovídá, že odpor vzduchu bude hrát významnou roli v energetické náročnosti. Dalším krokem v postupu bylo určení součinitele odporu vzduchu. Postup byl následující. Byly vytyčené dvě různé trasy dlouhé **500 m**, kde je krásný nový a čistý rovný asfalt. Úsek byl projížděn tam i zpět a výsledná hodnota součinitele byla zprůměrována, opět kvůli zamezení chyby ze stoupání nebo klesání. Odpor valení pneumatiky po silnici je již známý, a proto mohlo dojít k jeho odečtení při určování odporu vzduchu.

Použil jsem opět dva přístupy určení součinitele aerodynamického odporu vzduchu. Prvním byla dojezdová zkouška, ve které se postupovalo stejným způsobem jako při určování součinitele odporu valení viz. kapitola 5.2.1 Odpor valení. Při dojezdové zkoušce vycházely následující hodnoty:

X	Měření 1	Měření 2
Součinitel odporu vzduchu	0,665	0,554

Celé měření probíhalo tak, že se na rovinném úseku za úplného bezvětří rozjelo kolo na rychlost zhruba okolo **50 km/h** a poté se bez další akcelerace zpomalovalo až do rychlosti zhruba **14 km/h**. Načtené hodnoty se opět zpracovaly ve dvou závislostech. První byla závislost rychlosti na čase. Z této závislosti se přes **polynom 3. stupně** určily hodnoty zrychlení. Následovala závislost zrychlení na druhé mocnině rychlosti, kde z rovnice přímky došlo k výpočtu c_x stejně, jako pro určení součinitele odporu valení f .

Druhým přístupem byla opět cesta přes energie. Stejně jako tomu bylo při měření odporu valení, měřilo se při konstantních otáčkách tedy při konstantní rychlosti. V tomto případě byla rychlost nastavena na hodnotu **55 km/h**. Z předchozích měření se odečetla energie spotřebovaná na valení po stejném úseku asfaltu, která již je známá. Opět pomocí jednoduchého vzorce došlo k napočítání součinitele odporu vzduchu.

$$W = F * s \text{ [J]} \text{ z toho } F = \frac{W}{s} \text{ [N]} \text{ energie a dráhy byly měřené veličiny} \quad (25.)$$

Čas [s]	Energie [J]	Přírutek energie [J]	Otáčky [erpm]	Rychlost [m/s]	Přírutek dráhy[m]	Energie pro odpor valení [J]	Energie pro vzduch [J]
7.9	196796.6	180.02	7649.6	15.27	1.53	21	159.02
8	196976.5	179.94	7621.4	15.21	1.52	21	158.94
8.1	197151.2	174.64	7641.7	15.25	1.53	21	153.64
8.2	197327.7	176.48	7630.2	15.23	1.52	21	155.48
8.3	197502.4	174.77	7617.0	15.21	1.52	21	153.77
8.4	197682.6	180.16	7658.1	15.29	1.53	21	159.16
8.5	197862.2	179.66	7634.9	15.24	1.52	21	158.66
8.6	198038.1	175.86	7626.3	15.22	1.52	21	154.86
				15.24	1.52		156.69
Sx	0.9902	[m2]	čelní průřez				
p	1.2	[kg/m3]	hustota vzduchu				
F	103.085	[N]	síla				
c _x	0.747	[-]	souč. odp. vzduchu				

$F = W / s \text{ [N]}$

$$F = 0,5 * c_x * S_x * \rho * v^2$$

$$c_x = (2 * F) / (S_x * \rho * v^2)$$

Obr. 50: Postup výpočtu a část naměřených dat pro výpočet součinitele odporu vzduchu c_x

Měření na odpor vzduchu proběhlo celkem **6x** na dvou různých silničních trasách. Je důležité podotknout, že vše bylo měřeno za bezvětří, aby nedocházelo k ovlivnění vnějším prostředím. Výsledky měření energetickou metodou jsou následující:

X	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4
Součinitel odporu vzduchu	0,747	0,717	0,635	0,79

Celkově vyšly hodnoty, které se od sebe ve velké míře neodlišovaly proti úplně prvním měřením na začátku předmětu projekt III., kde hodnoty vycházely s velkým rozptylem. Měření se zlepšilo, když jsem přešel z klasické komunikace **RX**, **TX** neboli běžného **USB**, které poměrně často padalo díky elektromagnetickým polím a záření, na komunikaci po **CAN** sběrnici. Správně odstíněná sběrnice nedělala více problémy se záznamem a data z měření byla vždy kompletní bez pádů. Bohužel jednotka zatím nepodporuje záznam do paměti a následné stažení na kartu nebo posílání při připojení na WIFI síť. To by byla asi nejlepší a nejspolehlivější možnost. Do dnešní doby je nutné dělat záznam v reálném čase do PC, a proto jsem byl nucen mít stále svůj notebook na zádech, i když měření a otřesy nebyly to pravé pro stabilní spojení těchto dvou přístrojů k měření. Následující hodnota představuje průměr ze všech měření a tato hodnota je používána do všech výpočtů. Dalším změnám, odchylkám a vlivům součinitele odporu vzduchu se budě věnovat **kapitola citlivostní analýza**. Součinitel odporu vzduchu **$c_x = 0,68$** .

V posledním odstavci zpětně porovnáám, jaký vliv měl odpor vzduchu na měření součinitele valivého odporu. Při rychlosti **15 km/h** je odpor vzduchu **7,01 N**. Tedy po odečtení od síly napočítané z energie:

$$W = F * s [J] \text{ z toho } F = 7,01 = \frac{W}{s} [N] \quad (26.)$$

Vycházejí nové hodnoty součinitele odporu valení následujícím způsobem:

X	Silnice	Zpevněná cesta	Horší zpevněná cesta	Lesní cesta
Původní	f=0,033	f=0,061	f=0,077	f=0,069
Nový	f=0,027	f=0,056	f=0,072	f=0,064

5.3 Deformace, ztráty a prokluz kola

Tato kapitola doplňuje další jevy a chování kola Boxxbike Adventure při měření. Výpočty se nezabývaly a nebraly ohled na deformace pneumatiky, rámu, ráfků při jízdě, stejně tak prokluz kola na kameni nebo kořenu. Jsou to ale hodnoty, které se občas objevují na zaznamenaných datech. V této práci na ně nebyl kladen důraz a nejsou brány v potaz. Tento typ dat je odfiltrován kvůli problémovým stavům, které jsou tímto vnášeny do výpočtu. Pokud by bylo uvedeno na příkladu z měření, co je myšleno prokluzem, je to vidět na následujícím obrázku.

čas [s]	Přikon motoru [W]	motor rpm na každý pól [rpm]	Přepočtená hodnota rychlosti [m/s]
161	0.000	4230.261	8.44
161.1	772.666	4328.560	8.64
161.2	1062.698	4418.597	8.82
161.3	1112.359	4638.521	9.26
161.4	1125.055	4702.111	9.39
161.5	1171.418	4384.933	8.75
161.6	1360.023	4532.260	9.05
161.7	1510.217	4686.474	9.36
161.8	1593.701	4705.501	9.39

Obr. 51: Zachycení možného při brždění kola vlivem nárazu kola na kořen nebo kámen

Je možné vidět, jak příkon motoru stoupá nehléd' je na otáčky motoru nebo rychlost, která stoupá také až do jednoho okamžiku. Toto chování je přisouzeno nárazu kola o kámen nebo kořen nebo větev a proto jeden z údajů vybočuje z řady.

Stejně tak k těmto jevům docházelo při prvních měření na starším použitém kole, kde jedno kolo nebylo vycentrováno správně na výšku a docházelo tedy i při jízdě na silnici, kde kmitání rychlosti vlivem změny průměru kola. Tato data nebyla použita, ale metodika výpočtu a náhled už použity byly na nová přesná data z nového kola.

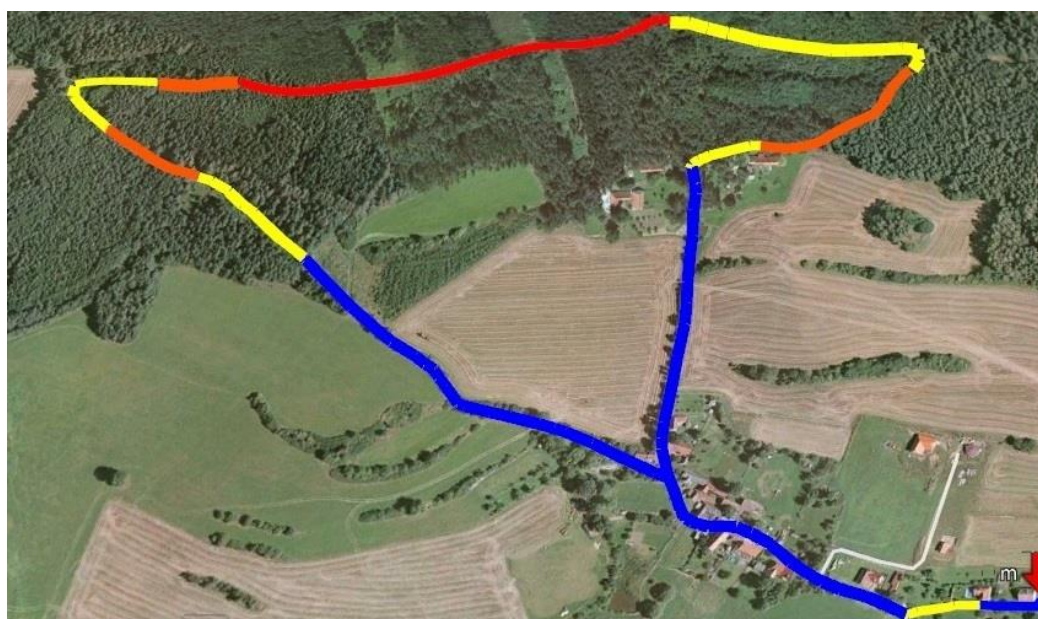
Další, na co nebyl brán zřetel, byly účinnosti mechanických částí a některých elektrických částí. Nebraly se v potaz účinnosti nábojů kol, ložiska na elektromotoru, vliv adheze při jízdě. Nebrala se také v potaz účinnost regulátoru, který má ztráty asi okolo **1-1,5 %**. S tím je spojená i účinnost baterie a její schopnost vydávat energii při jízdě. Zkoušel jsem si tuto účinnost spočítat a na proudy, které z baterie využíváme, se ztráty v teple vlivem vybíjení baterie pohybovaly okolo **5-10 %**. Všechna tato zjednodušení budou později vztažena do korekčního součinitele, který bude zaveden v programu pro zpřesnění výpočtů.

6. ZPRACOVANÁ DATA

Tato kapitola se zaměří na seznámení s teoretickou částí práce. Bude probráno a porovnáno teoretické zpracování naměřených dat a napočítaných dat s údaji z reálného měření na charakteristickém okruhu. Budou představeny poslední dopočítané a doměřené hodnoty koeficientů pro finální výsledky. V závěru kapitoly najdete náhled na jednoduché programy v MS - Excelu, které byly využívány pro zjišťování, zpracování a zobrazování výsledků. MS – Excel sloužil i pro samotné ukládání měřených dat do .csv formátu, ze kterého byly vyextrahované pouze důležité části dat a přeloženy do klasického souboru .xls . Při samotném měření byly použity základní pomůcky, jako je GPS lokalizátor pro zaznamenávání trasy, rychlosti a nadmořské výšky sloužící k ověření správnosti a porovnávání s daty vyčítanými na jednotce, klasické pásmo při odměřování konkrétních drah, stopky pro zjišťování přesného času, notebook pro zaznamenávání dat v reálném čase při jízdě.

6.1 Charakteristická trasa

Tato trasa už zde byla zmíněna, ale nyní poukážu na pár dalších důležitých údajů pro finální výpočet. Trasa, jak je možné vidět na obrázku, byla rozdělena na jednotlivé úseky. Každá část úseku představovala určité procento z celkové trasy a také část výškového profilu, který musel být překonán po daném typu povrchu. Následující obrázek představuje celou trať.



SILNICE - 1505,7 m / 47%

ZPEVNĚNÁ CESTA - 786,5 m / 24,5%

HORŠÍ ZPEVNĚNÁ CESTA - 431,1 m / 13,5%

LESNÍ CESTA - 483,5 m / 15%

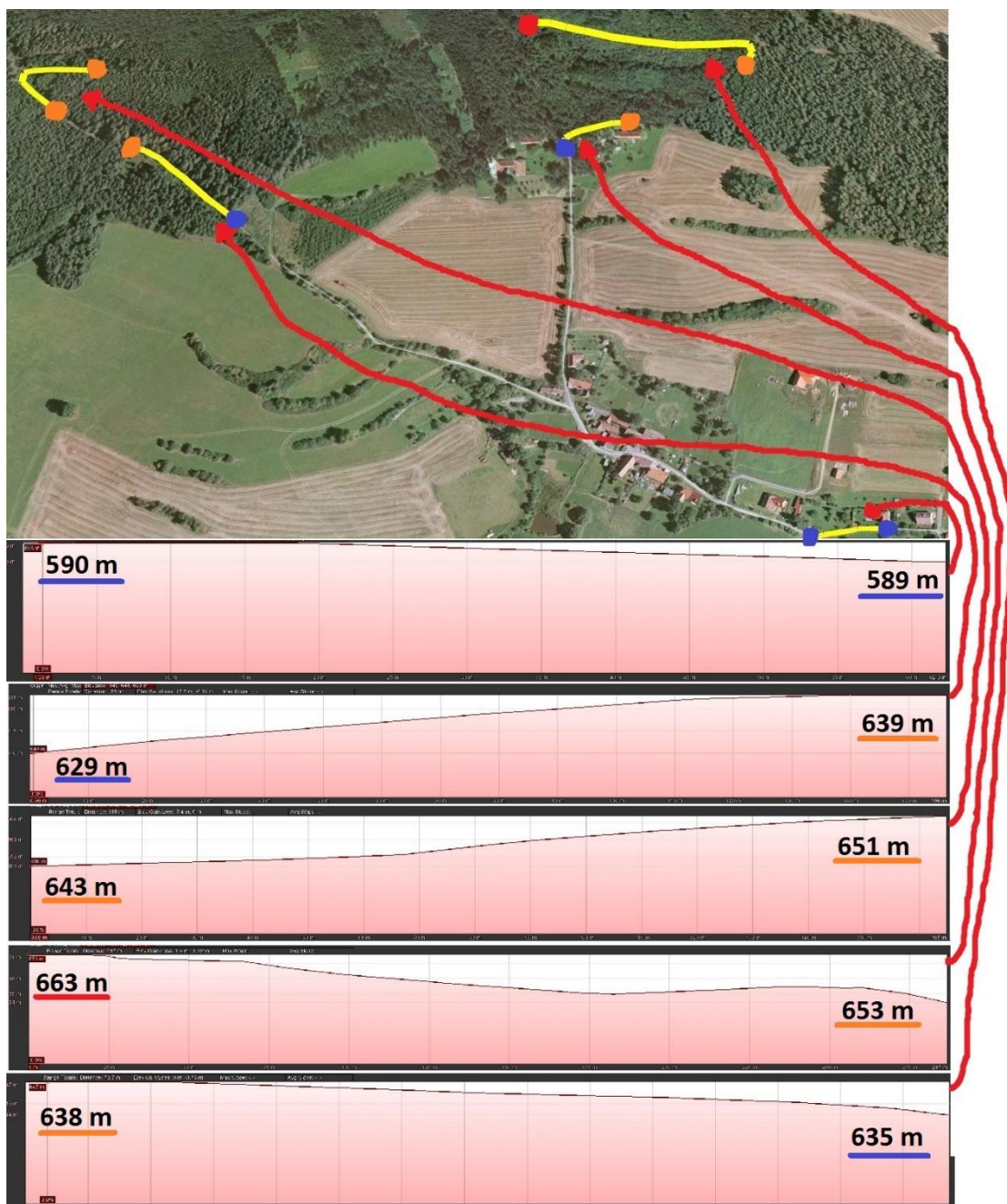
Obr. 52: Bližší rozbor charakteristické trasy pro měření s jednotlivým číselným rozdělením

Celková trasa představovala vzdálenost **3206,8 m**. První a zároveň nejdelší měřený povrch je silnice. Silnice představovala z celkové trasy **47 %**, což je **1505,7 m**. Následující obrázek představuje samostatně první úsek povrchu silnice spolu s výškovým profilem vztaženým ke každému úseku. Kvalita silnice je shodná s tou, na které byl měřen součinitel odporu valení a součinitel odporu vzduchu. Fialový kruh je start a zároveň zde trasa končí. Trasa vede přes vesnici, abychom se dostali co nejrychleji do terénu. Na stejný začátek a konec bude ještě upozorněno v **kapitole 6.2** při zobrazování výsledků. Výškové profile trati jsou znázorněné různými barvami - viz obrázek. Na úseku bylo překonáno stoupání **46 m** na **704 metrech** při maximální rychlosti **54,8 km/h**.



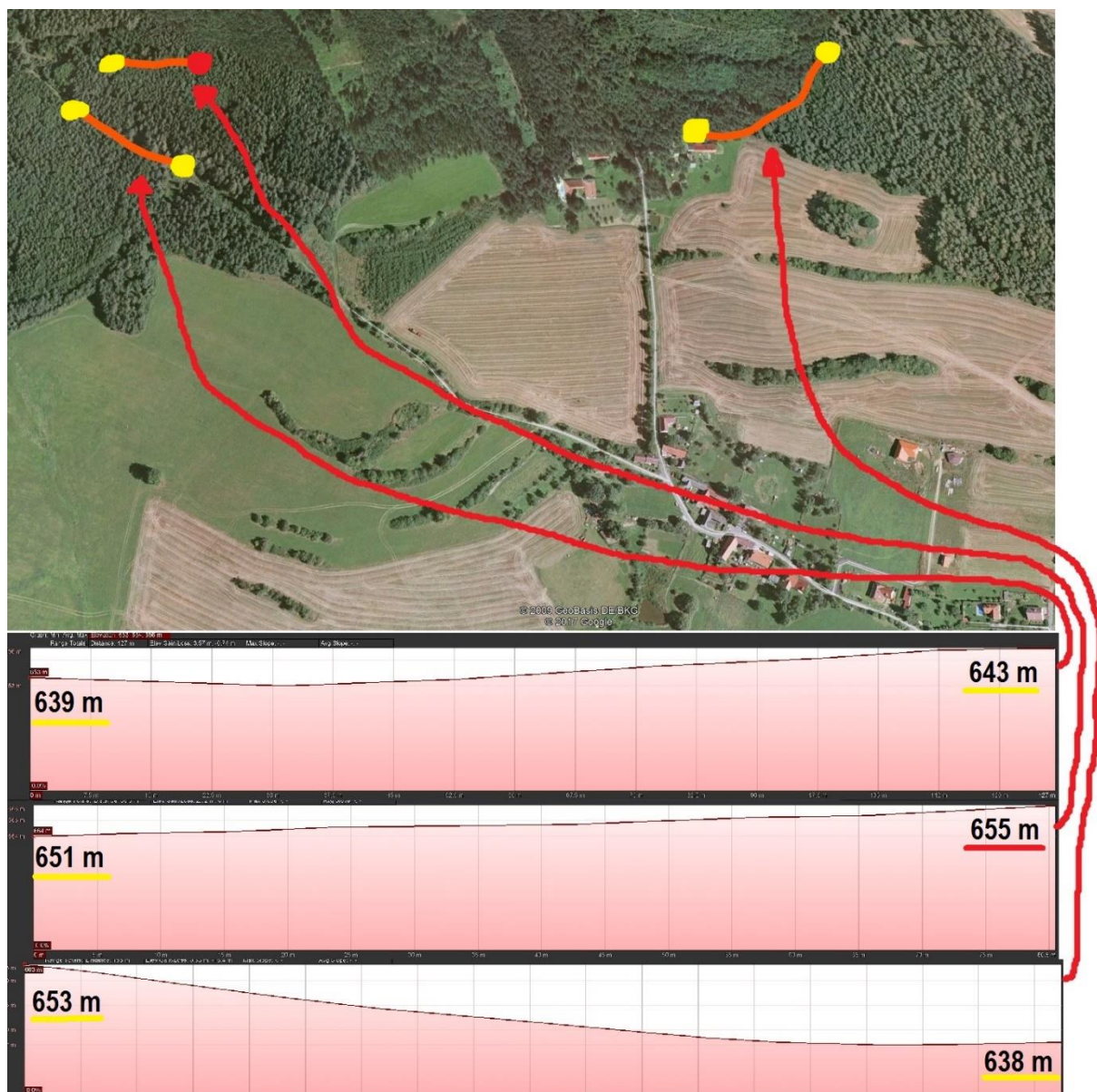
Obr. 53: Rozbor úseku silnice s jeho výškovým profilem. Silniční úsek se skládá ze tří částí, první úsek se na konci opakuje ale v opačném směru

Další částí je zpevněná cesta. Je to klasická běžná cesta následujících vlastností. Je vytvořená za léta ježdění těžkou technikou, jako jsou traktory, nákladní auta a další. Povrch je nejčastěji hlinitý, v létě velmi pevný a tvrdý, pokud vyschne, je hodně prašný. Za mokra a deště se povrch stává mírně bahnitý a kluzký. Představuje obecně velkou část cest a tras, po které jezdí kola Adventure. Terén není náročný, takže je vhodný i na první jízdy pro začátečníky. Představuje druhou nejdelší část trasy, konkrétně **786,5 m**, tzn. **24,5 %** z celkové trasy. Nejvyšší stoupání bylo **10 m** na vzdálenost **156 m**, nejvyšší rychlost na trase byla **52 km/h**.



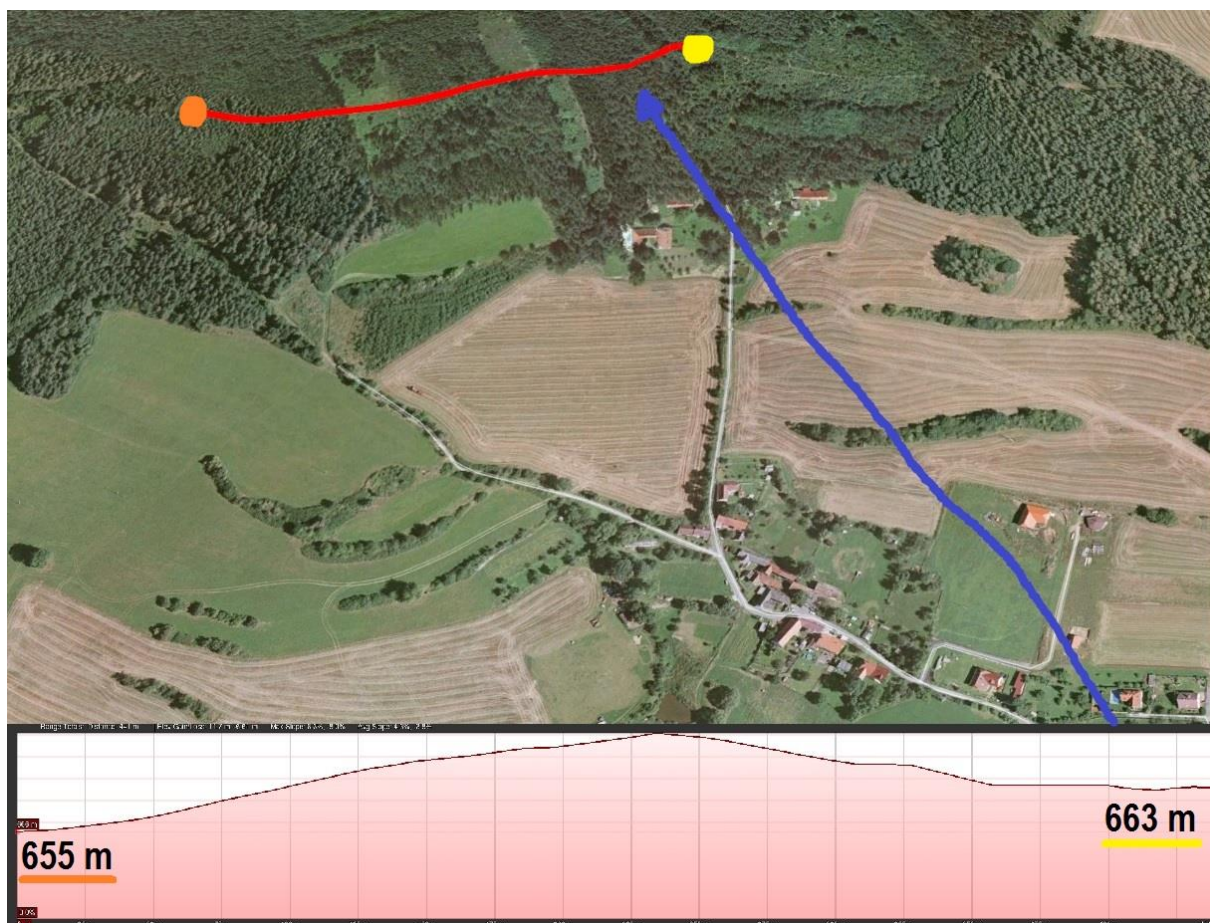
Obr. 54: Rozbor úseku zpevněné cesty s výškovým profilem. Zpevněná cesta se vyskytovala na charakteristické trati celkem pětkrát, první úsek se opakoval v opačném směru při cestě zpět

Předposledním povrchem je horší zpevněná cesta. Takto jsem označil poměrně komplikovanou cestu s velkým množstvím kamenů nebo kořenů. Při měření vycházela, co se týká odporu valení, nejhůře. U této části trasy docházelo k největšímu zkreslování naměřených hodnot vlivem deformace kola nebo prokluzu na kamenu nebo kořenu. Celkem trasa představovala **431,1 m**, což je **13,5 %** z celkové trasy. Horší zpevněná cesta je vhodná pro zkušenější jezdce, protože má tendenci rozhazovat vedení předního kola a je třeba se velmi soustředit pro správné vedení a ovládání kola zvláště při vyšší rychlosti, jakou se na Adventure většinou jezdci pohybují. Nejvyšší stoupání představovalo **4 m** na vzdálenosti **80 m**. Maximální rychlost na tomto typu povrchu byla **49 km/h**.



Obr. 55: Rozbor úseku horší zpevněné cesty s výškovým profilem. Horší zpevněná cesta se vyskytovala na charakteristické trati celkem třikrát

Posledním úsekem, na kterém probíhalo měření, byla lesní cesta. Jedná se o klasickou známou smrkovou lesní cestu plnou jehličí a šišek. Povrch je i za mokra poměrně neměnný. Je do určité hloubky dost měkký a proto bylo velmi zajímavé, že součinitel odporu vyšel nižší, než na horší zpevněné cestě. Zde se jede velice příjemně, protože měkký terén skvěle pobírá všechny nerovnosti a výmoly. Z celkové trasy představovala lesní cesta vzdálenost **483 m**. Nejvyšší stoupání bylo **8 m** na vzdálenosti **310 m**. Maximální dosažená rychlost byla **38 km/h**.



Obr. 56: Rozbor úseku lesní cesty s výškovým profilem. Lesní cesta se vyskytovala na charakteristické trati pouze v jedné části

6.2 Stanovování energetických ztrát

Energetické ztráty vycházejí přímo z odporu ze stoupání, odporu vzduchu, odporu akcelerace a odporu valení. Přístup byl takový, že po úpravě integrálního vyjádření dostáváme přímo energetické ztráty v joulech. Integrální vyjádření bude představeno dále. Platí, že celková spotřebovaná energie na kole se rovná součtu jednotlivých energií. Zrychlení nebo zpomalení je bráno v potaz jako konstantní, protože se děje ve velice krátkém čase **0,1 vteřiny**. Tedy platí, že:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (27.)$$

Integrální vyjádření pro energii spotřebovanou pro odpor valení je následující:

$$E_v = \int_0^{t_1} (m * g * \cos \alpha * f) * v * dt = m * g * \cos \alpha * f * \frac{1}{a} * \left[\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right] [J] \quad (28.)$$

Pro energii z odporu stoupání platí následující:

$$E_s = \int_0^{t_1} (m \cdot g \cdot \sin \alpha) \cdot v \cdot dt = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \frac{1}{a} \cdot \left[\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right] [J] \quad (29.)$$

Předposlední energii, která se napočítávala, byla energie z odporu vozidla akcelarovat. Pro tuto energii platí:

$$E_{zr} = \int_0^{t_1} (1 + \delta) \cdot m \cdot a \cdot v \cdot dt = (1 + \delta) \cdot m \cdot \left[\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right] [J] \quad (30.)$$

Posledním typem energie byla spotřebovaná energie k překonání odporu vzduchu:

$$E_{vz} = \int_0^{t_1} \left(\frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^2 \right) \cdot v \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot S_x \cdot c_x \cdot \frac{1}{a} \cdot \left[\frac{v_2^4}{2} - \frac{v_1^4}{2} \right] [J] \quad (31.)$$

Na následujícím obrázku bude rychlá demonstrace použití naměřených nebo předem napočtených dat k určení výsledku a použití rovnice uvedené výše.

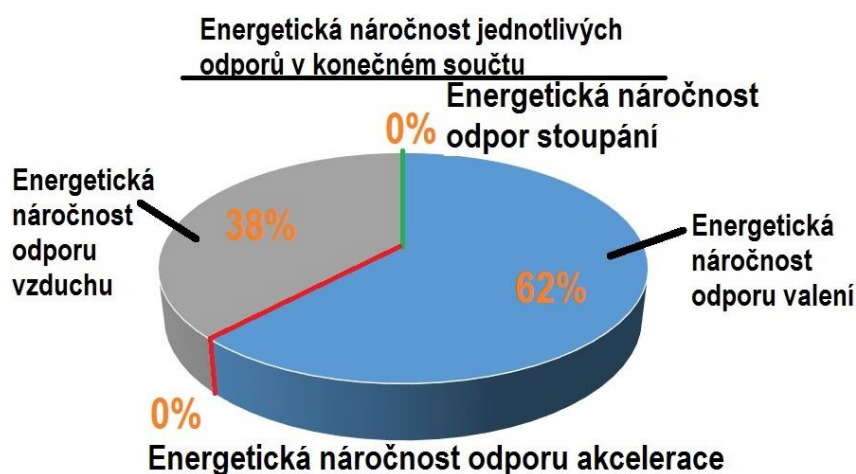
čas [s]	Přepočtená hodnota rychlosti [m/s]	Energie odporu valení [J]	Energie odporu stoupání/klesání [J]	Energie odporu vzduchu [J]	Energie z odporu ze zrychlení [J]
150.3	5.90	61.40	79.88	14.17	108.95
150.4	6.17	63.51	79.01	16.66	234.49

Vzduch: $E_{vz} = \int_0^{t_1} \left(\frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot c_x \cdot S \cdot v^2 \right) \cdot v \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot c_x \cdot S \cdot \frac{1}{a} \cdot \left[\frac{v_2^4}{2} - \frac{v_1^4}{2} \right] = \frac{1}{2} \cdot 1,2088 \cdot 0,99 \cdot \frac{1}{2,9} \cdot [724,6 - 605,8] = 16,66 J$

$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$

Obr. 57: Příklad a postup pro výpočet energetické náročnosti odporu vzduchu pro jeden naměřený údaj

Závěr zobrazuje procentuální porovnání spotřebované energie na charakteristické trase. Energeticky nejnáročnější byl pro kolo odpor valení a poté odpor vzduchu.



Graf 10: Procentuální rozdělení energetické náročnosti na charakteristické trase mezi jednotlivé energetické odpory – platí v součtu pro celou trasu

Všimněte si, že na trase vychází energetická náročnost stoupání, případně akcelerace, téměř nulové vlivem drobných nepřesností. Důvod je jednoduchý. Charakteristická trasa začíná a končí ve stejném místě a do svého konce a začátku se kolo vrací po stejné trase. Pro odpor stoupání se po trase mění potenciální energie. Tedy potenciální energie je kladná při vyjíždění kopce a při jeho sjezdu se znaménko obrací. V konečném součtu, kdy je začátek a konec trasy totožný, je rovna nule.

Stejně tomu je u odporu ze zrychlení. Zde se naopak bere v potaz změna kinetické energie. Tedy změna rychlosti po trase. Od startu z nulové rychlosti až do cíle opět do nulové rychlosti. U těchto změn potenciální a kinetické energie je výhoda v systému rekuperace energie. Tedy při těchto změnách je možné s určitou účinností uložit energii zpět do baterií a znovu ji později použít. Tato energie je napočítána a tím snižuje celkovou energetickou náročnost pohonu. S touto energií se musí počítat, protože se přímo promítá v jednotlivých odporech v teoretické části a je důležité udržet korespondenci mezi reálným měřením a teoretickým zpracováním. Při brždění je tažná síla na kole záporná, což je důsledek kinetické energie případně potenciální energie, kterou kolo má a kterou musíme brzdít. S narekuperovanou energií se uvažuje, protože se promítá na zadním kole. Skutečnost, že ovlivňuje stav baterie, je z tohoto pohledu irelevantní. S rekuperací jsou počítány všechny výsledky a je uvažována jako výsledná energie.

6.3 Stanovování součinitele rotačních hmot

Součinitel rotačních hmot je číslo, které charakterizuje vynaložení extra energie na pohyb posuvný pro rotační hmoty. Kinetická energie celého stroje se tedy skládá z hmot posuvných a rotačních. Pokud jede jezdec na kole Adventure, musí se do kinetické energie zařadit rotující části, jako jsou kola, ráfky, dráty, pneumatiky, motor otáčející se v zadním náboji a další. Další část, která nesmí být vynechána, je hmotnost samotného kola a hmotnost jezdce. Obecně platí, že posuvné hmoty jsou všechny a některé hmoty se navíc ještě otáčejí. Zvětšuje se tedy fiktivně jejich posuvná hmota. Platí, že pro rotační hmoty je důležité využít více mechanické práce pro jejich roztočení. Aby byla zachována konvence mezi rotačními a posuvnými hmotami, je důležité zavést veličinu, která se nazývá součinitel rotačních hmot. Tento součinitel fiktivně navyšuje hmotnost stroje a tím zachovává rovnost. Platí, že nová hmotnost se značí jako m_{red} . Rovnici lze také přepsat do tvaru:

$$m_{red} = m_v * (1 + \delta) [kg] \quad (32.)$$

Většinou je tento součinitel známý pro běžně se vyskytující stroje jako osobní automobily nebo kolejová vozidla. Pro výpočet je důležitá pouze znalost základních geometrických rozměrů a hmotnosti jednotlivých částí. Dá se vypočítat z kinetické energie následujícím způsobem.

velikost kol: 24 palců $\Rightarrow r_d = 0.305 [m]$ - r_d – dynamický poloměr kola v mém případě statický

$$\text{délka oblouku otáčky kola: } x = r_d * \alpha [m] \quad (33.)$$

$$\text{kinetická energie:} \quad (34.)$$

$$E_k = \frac{1}{2} * m_{jezd} * \dot{x}^2 + \frac{1}{2} * m_{kola} * \dot{x}^2 + \frac{1}{2} * J_{př} * \frac{\dot{x}^2}{r_d^2} + \frac{1}{2} * J_{zad} * \frac{\dot{x}^2}{r_d^2} [J]$$



Obr. 58: Rozdělení hmotnostních účinků pro součinitel rotačních hmot

Platí, že všechny momenty setrvačnosti J jsou rozděleny na jednotlivá tělesa a poté dohromady posčítány, protože se otáčejí stejnou rychlostí. Poté se moment setrvačnosti bere jako jedna hodnota. Stejně tak v mém případě platí jedna hodnota pro přední kolo a pro zadní kolo. Vše se musí převést do jedné neznámé souřadnice, ve které se vše řeší. V tomto případě je to derivace dráhy podle času, tedy rychlost \dot{x} . Po vyjádření kinetické energie dojde k následující úpravě. Pokud $E_k = \frac{1}{2} * m_{red} * \dot{x}^2$ platí následující vztah:

$$m_{red} = \left(m_{jezd} + m_{kola} + J_{př} * \frac{1}{r_d^2} + J_{zad} * \frac{1}{r_d^2} \right) \quad (35.)$$

$$= (82 + 65 + 0,25 * \frac{1}{0,305^2} + 0,48 * \frac{1}{0,305^2}) = 154,87[kg]$$

Pro určení momentů setrvačnosti je důležité vycházet z mechaniky kontinua. Tedy v případě spojitě rozložené hmoty lze k určení momentu setrvačnosti použít vztah:

$$J = \int_M r^2 * dm \quad (36.)$$

Kde integrace se provádí přes celé těleso o celkové hmotnosti M .

Já jsem vycházel z jednoduchého integrálu pro moment setrvačnosti plného válce o poloměru r a hmotnosti m a tenké obruče, pro kterou platí totéž.

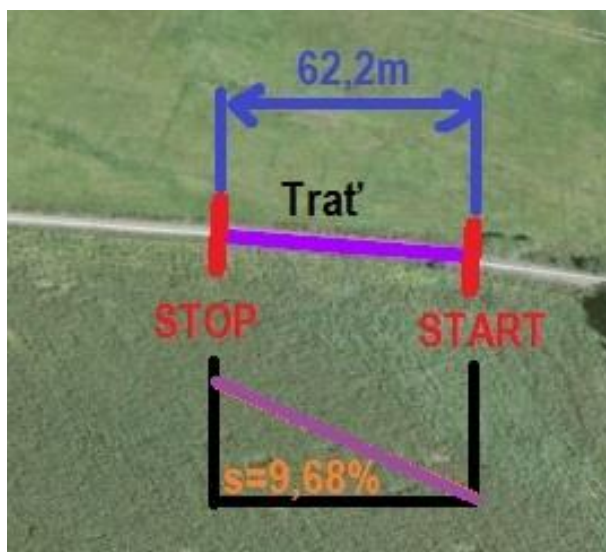
Pro plný válec platí: r – poloměr motoru; m – hmotnost motoru dosazuje)

$$J = \frac{1}{2} * m * r^2 \left[\frac{kg}{m^2} \right] \quad (37.)$$

Pro tenkou obruč platí: [31] r – poloměr ráfku; m – hmotnost ráfku

$$J = m * r^2 \left[\frac{kg}{m^2} \right] \quad (38.)$$

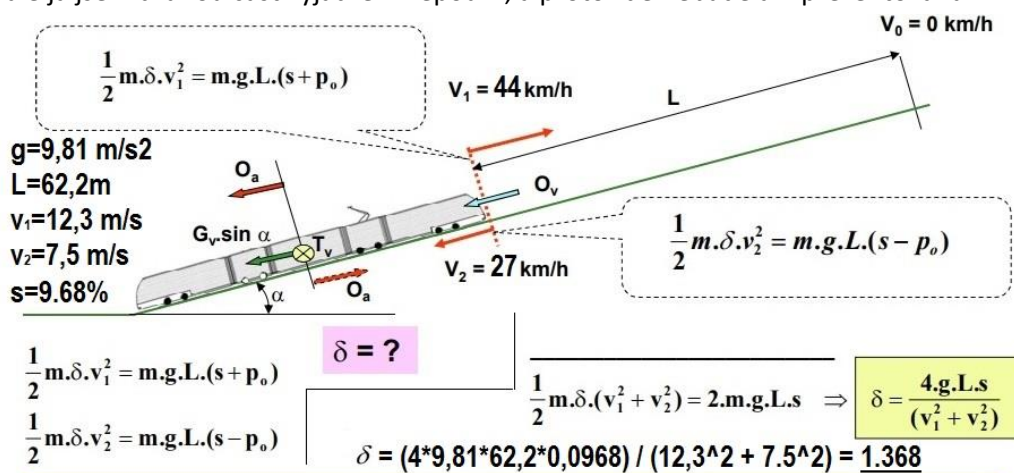
Výpočet probíhal stejně pro další části jako brzdové kotouče, dráty, gumu. Na počátku jsem si nebyl tímto výpočtem jist a věděl jsem, že bude nutné udělat i jiné měření. Po výpočtu a dosazení všech hodnot vyšla hodnota součinitele rotačních $\delta=1,0508$ tedy **5,08 %**.



Obr. 59: Vytyčený úsek pro měření součinitele rotačních hmot

Abych se ujistil, že tímto výpočtem nezanesu do měření a vyhodnocování další chybu, přistoupil jsem k závěru ještě k ověření tohoto součinitele rotačních hmot pomocí jiné měřicí metody. Na vytyčeném úseku jsem si do známého stoupání vytyčil přesnou vzdálenost, na které se budu s kolem pohybovat. Stoupání bylo určeno výpočtem na základě nadmořských výšek na začátku a na konci trasy. Poté se pouze vše přepočítalo z úhlu na stoupání pomocí závislosti tangenty úhlu na stoupání. Záměrně byla zvolena trasa do stoupání po známém povrchu, jak bude vysvětleno později. Povrchem byl pěkná a upravená silnice. Následující obrázek představuje úsek, kde se měření provádělo.

Celé měření probíhalo na základě Súskeho metody. Tato metoda je velmi chytrá a funguje na základě velice jednoduché podstaty. K rozpohybování rotačních hmot je důležitá energie. Prakticky poměřuje za stejných podmínek, co se děje, když je hmota v pohybu, a co se děje, když musíme investovat energii a čas k jejímu rozpohybování. Celá metoda vychází z následujícího obrázku. Jedná se opět pouze o potenciální a kinetickou energii. Vzájemně se tyto energie porovnávají a to jednou pro jízdu z kopce a jednou pro jízdu do kopce. Poté se obě rovnice spolu sečtou a upraví se do tvaru, který vidíte před žlutým rámečkem. Po vyjádření dochází k určení součinitele rotačních hmot. Místo vlaku si představte kolo. Funguje to úplně stejně. Tímto způsobem je možné určit i součinitel valivého odporu, ale já jsem druhou část vyjádření nepoužil, a proto zde nebude ani prezentována.



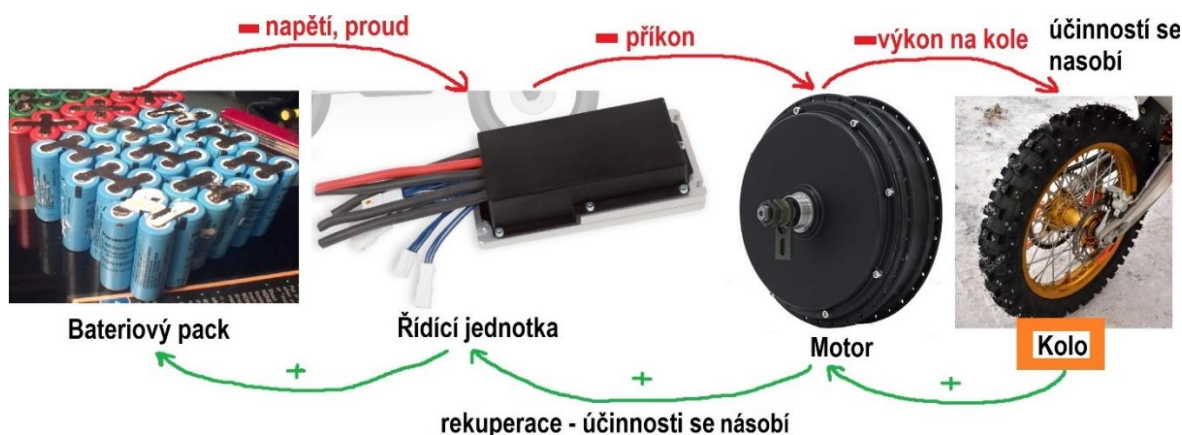
Obr. 60: Súskeho metoda a její popis – vypůjčeno od doc. Ing. Josefa Koláře z přednášek [32]

Jedná se o to, že rozjedu kolo do kopce určitou rychlostí. Při dosažení požadované rychlosti přestanu v přesně daném bodě akcelarovat a začnu měřit dojezd do kopce. Tedy rotační hmoty jsou v pohybu, mají svoji energii nabitou v setrvačných účincích. Měřím až do úplného zastavení a místo zastavení si poznačím na vozovku a uložím zaznamenané údaje. Otočím kolo z kopce dolů, pustím nahrávání dat a bez odrazu a akcelerace nechám volně kolo zrychlovat. Kolo nabírá rychlost, ale pomaleji, protože spousta energie se ukládá do setrvačných účinků. Ve stejném místě, kde jsem přestal akcelarovat, zastavuji měření a nahrávání dat. Cílem je dokázat, že v tom samém místě mám menší rychlost než při jízdě nahoru. Poté už postupuji dle žlutě vybarveného vzorečku. Dosadím délku dráhy, předem určené stoupání a tíhové zrychlení a do jmenovatele dosadím rozdíl rychlostí, který je zmíněn o pár řádků výš a dostávám součinitel rotačních hmot jako výsledek. V mém případě měření proběhlo **5x** na stejném úseku a výsledek součinitele rotačních hmot po jeho zprůměrování je **$\delta=1,12$ tedy 12 %**.

6.4 Naměřené hodnoty z jízdy

Pod pojmem naměřené hodnoty z jízdy myslím data naměřená na charakteristické trase na řídicí jednotce. Veličiny, které se měřily, byly použity pro další dopočítání výsledků. Část těchto veličin sloužila i k teoretickému zpracování. Jednalo se o časový krok **0,1 vteřiny** neboli celkový čas a otáčky zadního kola, které se přepočítaly na rychlost. Zaznamenával jsem veličiny jako čas, otáčky motoru, energie proudící přes kontrolér v obou směrech, miliampér hodiny, napětí baterie, proud použitý z baterie a příkon.

Došlo k tomu, že bylo nutné sestavit správný řetězec, protože v **kapitole 6.5** se vše řeší v energii vztažené na kolo, tedy při styku kola s povrchem. Bylo tedy potřeba převést příkon z řídicí jednotky na zadní kolo. Tím se přenesená energie snížila o účinnost elektromotoru. Bylo tedy nezbytné ve směru energie na zadní kolo přenásobit vše účinností. Účinnost elektromotoru byla stanovována dle měření, které měřil výrobce motoru na dynamometru a poskytl výčet hodnot v MS-Excel tabulce, podle které byl aproximován polynom čtvrtého stupně. Rovnice polynomu, která se využívala k dosazování účinnosti do jednotlivých kroků měření, jako závislost otáček na účinnosti. Jelikož motor, který používá Adventure, je pomaloběžný, představuje problém v nízkých otáčkách. Jedná se o SPM motor viz kapitola „**elektromotory**“, který nemá rád nízké otáčky a jeho účinnost není vysoká. Pohybuje se při jízdě mezi **40-80 %**, přičemž maximum je **88 %**. V průměru se hodnota drží okolo **67 %**, což není mnoho vzhledem k vysokým účinnostem elektropohonů. Když se vrátím ke zmíněnému řetězci, na obrázku je možné vidět, jak vypadá tok energie a v jakém místě byl brán v úvahu.



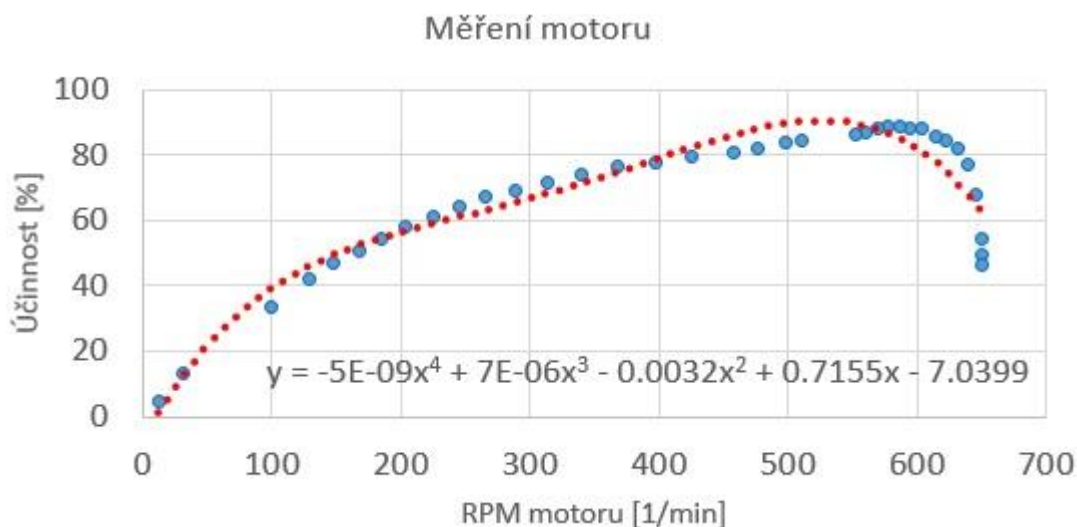
Obr. 61: Řetěz toku energie pro řešení toku energie na kole

Pro fungování řetězce bylo nutné správně stanovit účinnost elektromotoru. Jak již bylo v této práci zmíněno, neuvažovala se účinnost jednotlivých výše zmíněných členů, kromě majoritního a tím byl elektromotor. Byla vypuštěna účinnost baterie, řídicí jednotky i prokluz kola. Tzn., že nebylo bráno v úvahu množství energie, které je kolo schopné přenést na povrch pod ním. Následující tabulka zaznamenává část hodnot použitých pro další vyhodnocení, hodnoty představují měření na dynamometru mého elektromotoru poskytnuté od výrobce motoru.

Účinnost motoru v závislosti na otáčkách							
záznam	napětí	proud	příkon	moment	otáčky	výkon	účinnost
9	72.28	26.73	1932	27.3	604	1726	88.3
10	72.28	31.49	2276	32.6	595	2031	88.2
11	72.28	36.21	2617	38.3	586	2350	88.8
12	72.28	40.92	2958	43.8	578	2651	88.6
13	72.28	45.73	3305	49.5	570	2954	88.4
14	72.28	50.57	3655	54.9	561	3225	87.2
15	72.28	55.64	4022	60.8	552	3514	86.4
16	72.52	57.05	4137	66	511	3531	84.4
17	72.57	60.52	4392	71.5	498	3728	83.9
18	72.54	63.5	4607	76.8	477	3836	82.3
19	72.61	66.21	4808	82	458	3932	80.8
20	72.58	66.72	4843	87.5	426	3903	79.6

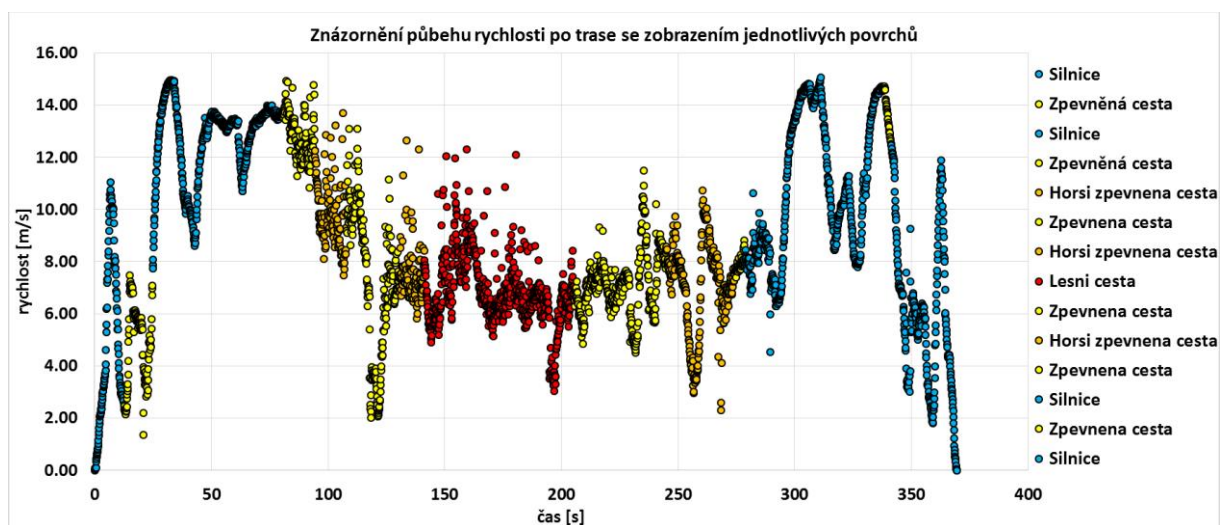
Tab. 7: Hodnoty při měření motoru na dynamometru

Samotná aproximace vychází ze závislosti otáček na účinnosti právě proto, že jsem schopen měřit přímo otáčky motoru za jízdy na řídicí jednotce. Následující obrázek přesně zobrazuje záznam výše. Tuto závislost jsem si proložil polynomem čtvrtého stupně, protože nejlépe kopíroval zobrazené modré body. S tím jsem dále pracoval. Pro každou hodnotu příkonu, zaznamenanou v každém bodě vzorkovací frekvence, jsem znal otáčky motoru, které jsem použil do polynomu. Výsledkem byla účinnost, pomocí které jsme přenášobil příkon a dostal jsem výkon na kole. Tím došlo ke správnému dopočítání energie, která dojde až na kolo.



Graf 11: Závislost otáček na účinnosti – zobrazení pro elektromotor použitý Adventure

Nyní jeden krátký odstavec, jak se data nasčítávala a ukládala. Před každým měření je důležité navolit na řídicí jednotce jaké hodnoty bude číst a zapisovat. V mém případě se četl záznam o elektrických otáčkách motoru, které se později přepočítaly na mechanické otáčky a poté na výslednou rychlost kola, kterou se pohybovalo. Dále bylo zadáno, aby se načítaly hodnoty spotřeby energie na jednotce v **joulech** a spotřeba z baterie v **mAh**. Posledním parametrem byl proud, který se používal z baterie na příkon a který směřoval dále do motoru. Nakonec bylo důležité nastavit periodu zaznamenávání. Zvolil jsem **0,1 vteřiny**. Při pozdějších úpravách se ukázalo, že citlivost a vysoká frekvence záznamu vedly v terénu k velkému zašumění dat. Následující graf závislosti rychlosti na čase představuje ukázkou dat bez filtrování v terénu. Je vidět, jak modré části vypadají poměrně dobře, protože pohyb probíhal na silnici. Oranžové, žluté a červené body představují poměrně velkou roztržitost hodnot při jízdě v horším terénu.



Graf 12: Průběh rychlosti po jednotlivém povrchu v závislosti na čase

V tuto chvíli by mělo být vše připraveno pro záznam dat. Po projetí celé trasy jsem zkontroloval, jestli jsou všechna data v pořádku a jestli nedošlo ztrátě části dat. Takto jsem jel trasu asi 4x, než byla data úplná čistá.

Pro výsledný program muselo dojít k filtrování některých rychlostí, protože vysoké zašumění způsobovalo špatnou aproximaci rychlosti při přiřazování rychlosti do libovolné trasy. Více bude popsáno v **kapitole 8**.

Trasa byla projeta celkem dvakrát se všemi uloženými daty a hodnoty z trati byly zprůměrovány do jedné. Celkem bylo vytvořeno **3698** záznamů. Celková doba jízdy byla **369,6 sec**. Na trase došlo ke spotřebování **2,024 Ah** z baterie s uvažováním rekuperace. Výsledky budou uvedeny jak s rekuperací tak bez ní. Samotné porovnání teoretického zpracování a praktického měření probíhá však pro rovnost výsledků s rekuperací.

Čas [s]	Příkon motoru [W]	motor elektrické otáčky [rpm]	Otáčky motoru [/min]	Energie kontrolér [J]	mAh kontrolér [mAh]	Přepočtená hodnota rychlosti [m/s]
235	3296.035	5042.809	315.18	347.281	1.76	10.07
235.1	3281.947	5256.817	328.55	337.719	1.71	10.49
235.2	3462.714	5462.179	341.39	353.688	1.80	10.90
235.3	3640.423	5753.496	359.59	356.188	1.82	11.49
235.4	44.753	5201.273	325.08	156.656	0.79	10.38
235.5	-3.851	4948.800	309.30	0.219	0.00	9.88
235.6	-0.989	4977.438	311.09	-0.063	0.00	9.94
235.7	1.534	4921.210	307.58	-0.031	0.00	9.82
235.8	-2.013	4946.875	309.18	-0.063	0.00	9.88
235.9	0.586	4964.507	310.28	-0.125	0.00	9.91
236	-0.165	4983.798	311.49	0.063	0.00	9.95
236.1	-1322.334	4321.991	270.12	-101.844	-0.46	8.63
236.2	-1112.564	4369.832	273.11	-125.094	-0.56	8.72

Čas [s]	Přepočtená hodnota rychlosti [Km/h]	Přírůstek ujeté dráhy [m]	Účinnost motoru podle otáček [%]	Výkon přenesený na kolo [W]	Celková přenesená energie včetně rekuperace na kolo [J]	Celková přenesená energie bez rekuperace na kolo [J]
235	36.24	1.01	66.7	2198.23	219.82	219.82
235.1	37.78	1.05	68.6	2252.87	225.29	225.29
235.2	39.25	1.09	70.7	2446.91	244.69	244.69
235.3	41.35	1.15	73.8	2686.13	268.61	268.61
235.4	37.38	1.04	68.1	30.49	3.05	3.05
235.5	35.56	0.99	65.9	-5.85	-0.58	0.00
235.6	35.77	0.99	66.1	-1.50	-0.15	0.00
235.7	35.37	0.98	65.7	1.01	0.10	0.10
235.8	35.55	0.99	65.9	-3.06	-0.31	0.00
235.9	35.68	0.99	66.0	0.39	0.04	0.04
236	35.82	0.99	66.2	-0.25	-0.02	0.00
236.1	31.06	0.86	69.9	-1891.73	-189.17	0.00
236.2	31.40	0.87	70.4	-1579.84	-157.98	0.00

Tab. 8: Malá část údajů záznamu – zelená část je část uložena z řídicí jednotky při jízdě a oranžová část je část napočítaná

Nyní jsou na řadě výsledky celého zpracování. Při jízdě na kole vyšla celková energie s uvažováním rekuperace na zadním kole **237,7 kJ**. Na tuto hodnotu se budu později odkazovat při dalších výpočtech. Bez uvažování rekuperace je energie **296,1 kJ**. To je hodnota, která ukazuje, jakou roli hraje rekuperace v pohonu. Je to velmi důležitý první údaj pro porovnání teorie s realitou a první krok k určení skutečného dojezdu.

6.5 Vypočtené hodnoty v PC – porovnání s kapitolou 6.4

Vypočtené hodnoty reprezentují teoretické zpracování energetické náročnosti trasy v závislosti na naměřených a napočítaných koeficientech, jako součinitel odporu valení, vzduchu, rotačních hmot a další. Zde se pracuje také ze základními údaji o hmotnosti jezdce a kola, hustotě vzduchu a dalších veličinách. Následující tabulka prezentuje veškeré koeficienty, se kterými se dále počítá a podle kterých se výpočty řídí.

HMOTNOST JEZDCE	82	Kg	
HMOTNOST KOLA	65	Kg	
REDUKOVANÁ HMOTNOST	164.64	Kg	
SOUČ. ROTAČNÍCH HMOT	12	%	
CELKOVÁ HMOTNOST	147	Kg	
TÍHOVÉ ZRYCHLENÍ	9.81	m/s2	
PRŮŘEZ Sx	0.9902	m2	
HUSTOTA VZDUCHU	1.2	Kg/m3	
SOUČ. AERODYNAM. ODPOR	0.68	-	
DYNAMICKÝ POLOMĚR PNEU	0.305	m	
SOUČ.ODPORU VALENÍ	ASFALT	0.027	-
	ZPEV.CESTA	0.056	-
	H.ZPEV.CESTA	0.072	-
	NEZPEV.CESTA	0.064	-

Tab. 9: Tabulka veškerých zpracovaných koeficientů

Teoretické zpracované hodnoty vycházejí z reálné jízdy pouze ve dvou veličinách. První veličinou, kterou přejímají, je **čas** a druhou jsou **elektrické otáčky** elektromotoru. Ještě bych chtěl vysvětlit, co jsou elektrické otáčky. Pokud se elektrické otáčky podělí počtem pól párů motoru, výsledkem jsou mechanické otáčky. Zbývající hodnoty jsou dopočítané nebo odvozené například ze zpracování charakteristické trasy. Před samotným odprezentováním výsledků ještě představím výpočetní program MS-Excel.

Čas [s]	Motor elektrické otáčky [rpm]	Přepočtená hodnota rychlosti [m/s]	Přepočtená hodnota rychlosti [Km/h]	Celková ujetá dráha [m]	Naměřená nadmořská výška [m]	ÚHEL fi od stoupání/klesání [°]
12.3	1315.484	2.63	9.45	60.49	590.31	-2.182
12.4	1330.515	2.66	9.56	60.75	590.30	-2.158
12.5	1257.693	2.51	9.04	61.00	590.29	-2.283
12.6	1234.159	2.46	8.87	61.25	590.28	-2.326
12.7	1161.146	2.32	8.34	61.48	590.27	-2.473
12.8	1122.801	2.24	8.07	61.71	590.26	-2.557
Čas [s]	Typ povrchu	Součinitel odporu valení	Energie odporu valení [J]	Energie odporu stoupání/klesání [J]	Energie odporu vzduchu [J]	Energie z odporu ze zrychlení [J]
12.3	ASFALT	0.027	10.55	-14.89	0.81	-76.26
12.4	ASFALT	0.027	10.28	-14.34	0.74	13.05
12.5	ASFALT	0.033	12.10	-14.84	0.70	-61.83
12.6	ZPEV. CESTA	0.056	20.07	-14.56	0.62	-19.24
12.7	ZPEV. CESTA	0.056	19.29	-14.87	0.55	-57.37
12.8	ZPEV. CESTA	0.056	18.39	-14.67	0.48	-28.73

Tab. 10: Malá část údajů záznamu – oranžová část je převzetí z reálné jízdy; zelená část je část napočítaná z výškového profilu, otáček motoru, typu povrchu; modrá část je energetická náročnost jednotlivých odporů

Jak již bylo řečeno, celá trasa se jela celkem dvakrát, a proto i teoretické zpracování proběhlo dvakrát. Připomenu krátce jednotlivé výsledky po zprůměrování hodnot. Energetická náročnost pro odpor valení po celé trase představovala hodnotu **207,7 kJ**. Energetická náročnost odporu vzduchu po celé trase byla **140,7 kJ**. Jak již bylo také řečeno, charakteristická trať začínala a končila ve stejném místě. Proto po ověření energetická náročnost z odporu ze stoupání případně klesání byla **0,15 kJ** a energetická náročnost z odporu ze zrychlení byla **0 kJ**. Energetickou náročnost nulových nebo téměř nulových odporů bylo důležité zpracovávat s ohledem na situaci, kdy by se jezdec nevracel do stejného bodu, z jakého vyrážel. Uvažoval jsem situaci, kdy jezdec bude chtít ujet co největší vzdálenost a bude nucen nabíjet kdekoliv na cestě. Pro to bude důležité znát všechny energetické náročnosti, aby se předešlo problémům s dojezdem. V konečném součtu všech energií poté vychází, že teoretická spotřeba se rovná **348,6 kJ**. Nyní bylo představeno vše důležité a můžeme přejít k rekapitulaci výsledků.

6.6 Rekapitulace výsledků

V této kapitole budu prezentovat srovnání reálného a teoretického měření, tedy stěžejní část a cíl této práce. Předtím bych chtěl ještě zrekapitulovat dosažené výsledky. Pokud se vrátím zhruba do poloviny práce, prvním důležitým bodem bylo stanovení součinitele odporu valení. Poté jsem měřil a stanovoval součinitel aerodynamického odporu. Proběhlo určení čelního průmětu plochy. Dále byl vypočítán a pro kontrolu naměřen součinitel rotačních hmot. Na základě zpracování celé charakteristické trati a za použití vše zmíněných koeficientů jsem dosáhl konečných výsledků. Spotřeba na trati při jízdě činila včetně rekuperace **237,7 kJ**. Součet energetické náročnosti při teoretickém zpracování dosahuje hodnoty **348,6 kJ**. Pokud tyto dvě hodnoty porovnáme, rozdíl je **31,82 %**. Vše je porovnáváno na stejné pozici v energetickém řetězci a tím je zadní kolo.

31,82 % je hodnota, která značí, s jakou chybou jsem měřil a pracoval. Pro většinu součinitelů bylo měření velmi složité a komplikované. Jak již bylo zmíněno, největší problém byl s měřením součinitelů odporu valení, protože měření v terénu je daleko komplikovanější než měření na téměř homogenním povrchu silnice, kde dochází k mnohem menšímu rozptylu hodnot. Za daných podmínek docházelo k rozptylu hodnot o **10 %** a více. Další poměrně komplikovaná oblast, kde se může vyskytovat značná odchylka, bylo měření součinitele aerodynamického odporu. Opět v porovnání s autem, které nijak zásadně nemění svůj čelní průřez ani c_x , při jízdě na elektrokole se tento průřez mění i když si jezdec jen rozeptne bundu, případně na kole jede někdo jiný. Na co bych rád upozornil, je fakt, že se na trase při teoretickém zpracování uvažuje po celou dobu jízdy konstantní aerodynamický součinitel, ale to v realitě neplatí a tento součinitel se v průběhu jízdy mění. Může to být pohybem na kole nebo tím, že chvíli jezdec jede v sedle a chvíli ve stoje nebo v závislosti na typu povrchu. Faktorem, který ovlivňuje odchylku, může být i vítr a počasí vůbec. Poslední, na co bych rád upozornil a čím bych chtěl ospravedlnit případné chyby a rozdíly v měření, jsou faktory, které jsem vynechával. Byl to například prokluz zadního kola při jízdě, dále neuvažování účinnosti ložisek nábojů a ložisek v motoru. Posledními faktory byly neznalost účinnosti baterie a její schopnosti výdeje energie a účinnost samotného regulátoru. Proto na závěr zavedu do výpočetního programu **v kapitole 8** korekční součinitel. Hodnotu, která srovná do stejné váhy teorii a praxi a schová všechny odchylky, chyby a nejasnosti. Hodnota korekčního nebo kalibračního součinitele, byla zavedena právě z důvodu návrhu nových tras, případně nových zapojení baterií a tento součinitel zaručí, že spotřeba se bude chovat jako reálná pro většinu případů. Vychází následujícím způsobem:

$$\beta = \frac{\text{realná spotřeba energie na trase}}{\text{teoretická napočítaná spotřeba energie na trase}} = \frac{237,7}{348,6} = 0,6818 \quad (39.)$$

Korekčním součinitelem se vždy přenásobí teoreticky napočítaná trasa nebo nově navržený koncept baterie tak, aby výsledek korespondoval s měřením.

Nyní, když je hotová všechna předběžná práce, můžeme se zabývat reálným dojezdem. Jak již bylo řečeno v **kapitole Specifikace, parametry a popis**, baterie je schopna odevzdat při našich podmínkách celkem **9154,8 kJ** energie. Při jízdě bylo předáno na kolo celkem **237,7 kJ** včetně rekuperace, tedy po podělení účinností motoru se dostávám k tomu, že z baterie bylo použito **398,83 kJ** včetně rekuperace. Vlivem rekuperace se tedy zásoba energie prodlouží. Na charakteristické trati o délce **3206,8 m** se zpět do baterie vrátilo **-37,9 kJ**. Jelikož jednotka vlivem rekuperace mění elektrický motor na elektrický generátor a tím i mění směr momentu, tedy vyvolává brzdový moment na kole a jelikož je kolo bez mechanické zadní brzdy, platí, že část energie je schopná se vrátit zpět do baterie a nezmaří se všechna na brzdovém kotouči. I přesto se část energie vlivem účinnosti motoru/generátoru přemění na teplo. Vzhledem ke spotřebované energii na jedno kolečko na charakteristické trase, byla rekuperace schopna vrátit **8,7 %** energie z celkové vydané energie. Pokud bych do konečných výsledků nepočítal rekuperaci, pokryla by energie za stejných podmínek dojezd **67,21 km**. Rekuperaci je však nutné brát v úvahu a díky ní se dojezd prodlouží o **6,39 km**. Tedy dojezd s rekuperací činí **73,6 km**. Pokud by se uvažovala ještě účinnost baterie, která je v tuto chvíli neznámá, přiblížili bychom se dojezdem reálné praxi. Více k reálnému dojezdu bude řečeno ještě v dalším odstavci. Je dobré si hodnotu rekuperace nechat v záloze jako záchrannou možnost pro jezdce a navrhování trasy nebo nového kola případně nové baterie.

Podle mých zkušeností je tedy reálný dojezd na mých kolech na jedno nabití je **65-70 km**. Odlišnost od vypočteného výsledku není výrazná a je důsledkem několika faktorů, které je těžké promítnout do výpočtu a zpracování. Jedním z faktorů může být trať. Charakteristická trať se odlišuje od tratí, kde běžně jezdím se svými zákazníky. To může mít dopad na odpor valení, který se může měnit viz. **kapitola citlivostní analýza**. Další rozdíl vidím ve znalosti trati. Po stanovené trati jsem jel asi **50x** a důvod, proč toto zmiňuji je ten, že SPM motor neboli motor, který používáme, nerad pracuje v nízkých otáčkách a funguje pak poměrně s nízkou účinností. Například přidání plynu pod kopcem sebere obrovské množství energie a velkou část přemění na teplo. Pokud ale kopec vyjíždím s rozjetím na určitou rychlost a otáčky motoru jsou vysoké, motor není přetížen příliš velkým momentem a spotřebovaná energie se sníží o **5-10 %**. Tato hodnota je založena na celoročním průvodcovství, kde na kolech Adventure jezdilo zhruba **100 různých lidí** a já jsem mohl sledovat a analyzovat jejich chování a kola samotná. Když trať dobře znáte, víte, jak ji nejlépe projet a jedete rychleji než ostatní. Po projetí celé trasy zůstává v baterii více energie tomu, kdo jel celou dobu rychleji a agresivněji. Je to paradoxní, ale opravdu tomu tak je. Jezdec, který jede plynuleji a předem analyzuje trasu, je schopen ušetřit poměrně velké množství energie. Tuto informaci nemám v práci podloženou žádnými daty, proto ji zmiňuji pouze pro zajímavost z praktického hlediska.

7. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

V této kapitole půjde o srovnání různých podmínek při změnách některých koeficientů a zjištění, které koeficienty nejvíce ovlivňuje konečný dojezd. Půjde o vliv počasí, geometrického tvaru, případně změnu jezdce. Řeč je hlavně o součinitelích odporu valení, dále součiniteli aerodynamického odporu vzduchu a pokud jde o geometrický tvar jednalo by se o plochu čelního průřezu, která se bude měnit i s jiným jezdce, stejně tak součinitel odporu vzduchu. V poslední řadě se jedná také o hmotnost jezdce. Odrážet se budu od teoretického zpracování a budu jej opět porovnávat s reálným měřením. Ještě pro připomenutí rozdíl mezi naměřenými hodnotami z jízdy a teoretickým zpracováním byl **31,82 %**. Budu uvažovat několik různých případů změny hodnoty dojezdu z původních **73,6 km**. Budu se snažit nasimulovat různé situace, ke kterým může dojít.

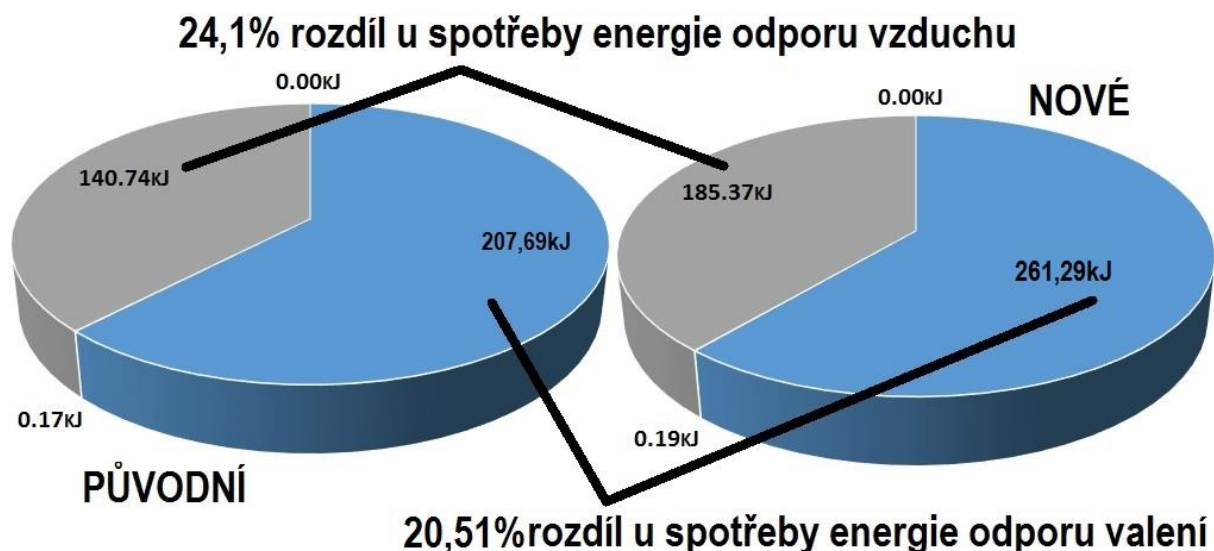
Prvním příkladem bude zákazník, který přijde na jízdu za špatného počasí při teplotě **0-10 °C**. Tím pádem se změní hustota vzduchu a naroste z hodnoty **1,2 kg/m³** na hodnotu **1,25 kg/m³**. Vlivem nízké teploty se jezdec musí přiblíží a budu proto počítat se změnou součinitel odporu vzduchu o **10 %** a se změnou plochy čelního průřezu o **15 %**. Dále vlivem více vrstev oblečení a pevnějších bot a vyšší tělesné hmotnosti vzroste váha o **22 kg**, oproti původní váze **82 kg** na **104 kg**. Počasí je sychravé a často prší, změní se tedy i terén. Mokrý silnice zvýší součinitel odporu valení o **5 %**. Zpevněná cesta a horší zpevněná cesta změní svůj součinitel odporu valení o **10 %**. Lesní cesta změní svůj odpor o **15 %**. Prokluz kol v tomto případě opět nebude uvažován, protože tato veličina nebyla brána v potaz ani při původním měření na trati. Každopádně by se tato hodnota za popsaného špatného počasí, kdy je v terénu kluzký povrch, projevila významněji, než za suchého a teplého počasí, které bylo při skutečném měření na trati. Následující tabulka prezentuje rozdíl mezi hodnotami. První sloupec zobrazuje původní hodnoty a druhý sloupec hodnoty upravené simulováním nových podmínek.

HMOTNOST JEZDCE		82 Kg	104 Kg
HMOTNOST KOLA		65 Kg	65 Kg
REDUKOVANÁ HMOTNOST		164.64 Kg	186.64 Kg
SOUČ. ROTAČNÍCH HMOT		12 %	10.44 %
CELKOVÁ HMOTNOST		147 Kg	169 Kg
TÍHOVÉ ZRYCHLENÍ		9.81 m/s ²	9.81 m/s ²
PRŮŘEZ S _x		0.9902 m ²	1.13873 m ²
HUSTOTA VZDUCHU		1.2 Kg/m ³	1.25 Kg/m ³
SOUČ. AERODYNAM. ODPOR		0.68 -	0.748 -
DYNAMICKÝ POLOMĚR PNEU		0.305 m	0.305 m
SOUČ. ODPORU VALENÍ	ASFALT	0.027 -	0.028 -
	ZPEV. CESTA	0.056 -	0.062 -
	H. ZPEV. CESTA	0.072 -	0.079 -
	NEZPEV. CESTA	0.064 -	0.074 -

Tab. 11: Tabulka konstant při jejich nárůstu různými vlivy

Při dosazení nových součinitelů a konstant se výsledek teoretického zpracování změní následujícím způsobem. Z původní hodnoty **348,6 kJ** se hodnota změní na **446,9 kJ**. Rozdíl hodnoty mezi jízdou na trati za původních a simulovaných podmínek narostl. Poměr mezi nimi činí **46,81 %**. Výrazně narostla hmotnost celkem o **20,51 %**, což se značně projevilo na energetické náročnosti

odporu valení. Na grafu energetických náročností níže v rozdílu mezi původními a simulovanými podmínkami je vidět, jak špatné počasí a navýšení hmotnosti negativně ovlivní spotřebu energie a celý dojezd kola. Změna součinitele odporu plochy čelního průřezu ale ukazuje, že kolo je velice citlivé na tyto změny a energetická náročnost narůstá rychleji. Přesto majoritní podíl spotřeby je stále z odporu valení. Spotřeba energie se vlivem změn na stejné trase zvedla na kole o **98,3 kJ** a dojezd za těchto nových podmínek je **57,42 km**, tedy o **16,18 km** méně. Je to veliký rozdíl, který významně ovlivňuje dojezd.



Dále jsem uvažoval opačnou změnu, kdy bude letní počasí s teplotou kolem **30°C**, hustota vzduchu se bude pohybovat okolo **1,15 kg/m³**, jezdcem bude drobná dívka, která váží i s letním oblečením **50 kg**, váha tedy klesne o **32 kg**. Jelikož je dívka drobnější menší postavy, její součinitel odporu vzduchu klesne o **10 %** a plocha čelního průřezu klesne o **10 %**. Součinitele odporu se změní následujícím způsobem. Povrch silnice zůstává stejný. Volbou snadnější trasy součinitel odporu na zpevněné cestě klesne o **5%**. Dívka nejede po horší zpevněné cestě, proto se na trase nebude vůbec vyskytovat. Vybírá si pěknou lesní cestu, kde součinitel odporu klesá o **5 %**. Opět podmínky platí stejně jako v předchozím případě - prokluz a další drobnosti nejsou brány v potaz. Hodnoty se změní následujícím způsobem.

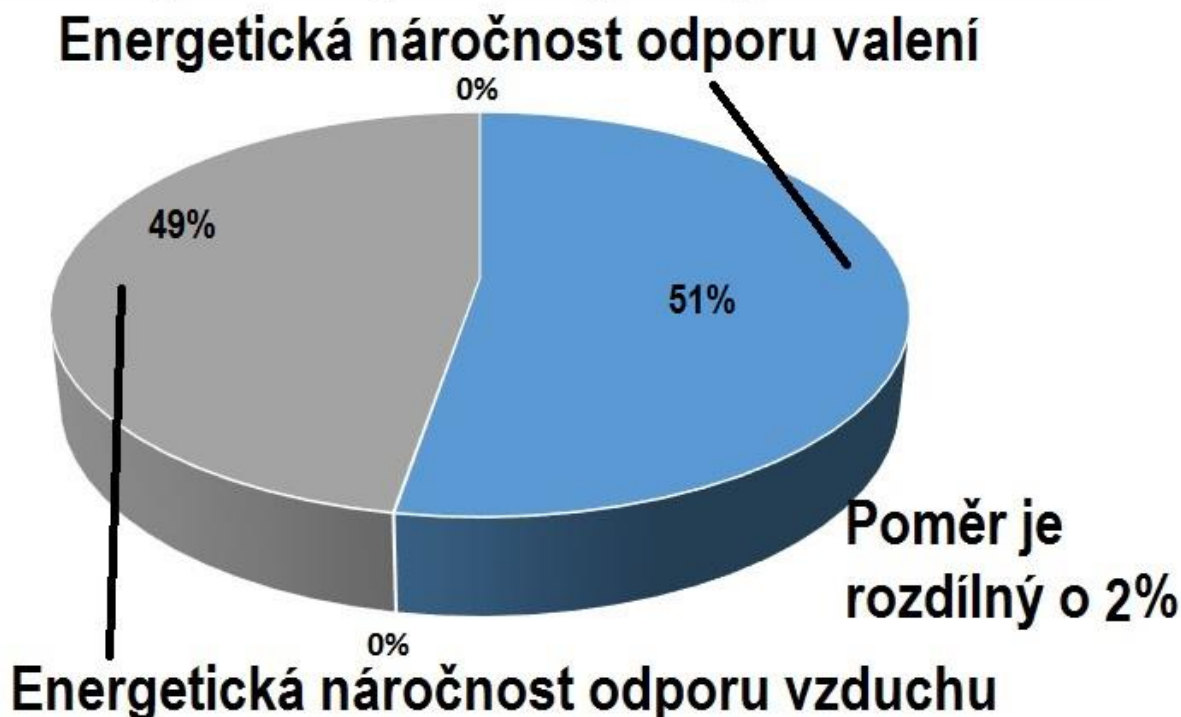
HMOTNOST JEZDCE	82 Kg	50 Kg
HMOTNOST KOLA	65 Kg	65 Kg
REDUKOVANÁ HMOTNOST	164.64 Kg	132.64 Kg
SOUČ. ROTAČNÍCH HMOT	12 %	15.34 %
CELKOVÁ HMOTNOST	147 Kg	115 Kg
TÍHOVÉ ZRYCHLENÍ	9.81 m/s²	9.81 m/s²
PRŮŘEZ Sx	0.9902 m²	0.8912 m²
HUSTOTA VZDUCHU	1.2 Kg/m³	1.15 Kg/m³
SOUČ. AERODYNAM. ODPOR	0.68 -	0.612 -
DYNAMICKÝ POLOMĚR PNEU	0.305 m	0.305 m
SOUČ. ODPORU VALENÍ	ASFALT	0.027 -
	ZPEV. CESTA	0.056 -
	H. ZPEV. CESTA	0.072 -
	NEZPEV. CESTA	0.064 -

Tab. 12: Tabulka konstant při jejich poklesu různými vlivy

Při dosazení nových součinitelů a konstant se výsledek teoretického zpracování změní následujícím způsobem. Z původní hodnoty **348,6 kJ** se hodnota změní na **259,00 kJ**. Rozdíl mezi původní a novou hodnotou výrazně klesl a velmi se přiblížil naměřené hodnotě. V tuto chvíli je poměr mezi teoretickou a reálnou hodnotou **8,22 %**. Energetická náročnost se velmi snížila. Největší podíl na tomto úbytku má opět hmotnost ve formě snížení odporu valení. Úbytek energetické náročnosti vlivem odporu valení je **27,96 %** a vliv lepšího odporu vzduchu a menší plochy čelního průřezu činí **22,37 %**. Oproti původním hodnotě se ušetřilo celkem **89,6 kJ** energie. Za těchto podmínek by byl dojezd kola **99,08 km**.

Předposledním testovaným scénářem bude změna koeficientů pro aerodynamický odpor vzduchu. Odpor valení a váha zůstávají původní odměřené. Součinitel odporu vzduchu se změní o **20 %** na hodnotu $c_x=0.816$. Průmět čelní plochy se změní také o **20 %** a jeho hodnota bude nyní **1.1882m²**. Hustota vzduchu zůstává na původní hodnotě. Výsledný poměr spotřebovaných energií podle typu vypadá následujícím způsobem.

Poměr jednotlivých energetických náročností



Sledujme, jak výrazně se odpor vzduchu dotáhl k energetické náročnosti odporu valení. To značí pouze jednu věc a to, že není možné jednoduše opomenout odpor vzduchu i na kole. Není vyloučeno, že objemnější člověk nemůže těchto hodnot dosáhnout. Dojezd za těchto podmínek malinko klesne z původní hodnoty na **62,5 km** tedy o **11,1km** méně.

Poslední simulací bude ovlivnění pouze odporů valení. Tedy konstanty spojené s odporem vzduchu zůstanou původní a změní se odpor na silnici, odpor na zpevněné cestě, horší zpevněné cestě a lesní cestě. Tento problém nastane podhuštěním pneumatik, které jsou v tomto stavu příjemnější do terénu. Hmotnost jezdce a další koeficienty zůstanou zachovány v původní hodnotě. Odpory se změní následujícím způsobem. Odvalování kola po silnici bude o **10% náročnější**, po zpevněné a horší

zpevněné cestě se odvalování stane energetický náročnější o **15 %** a lesní cesta si připíše podíl **20 %**. Hodnoty se změní následujícím způsobem.

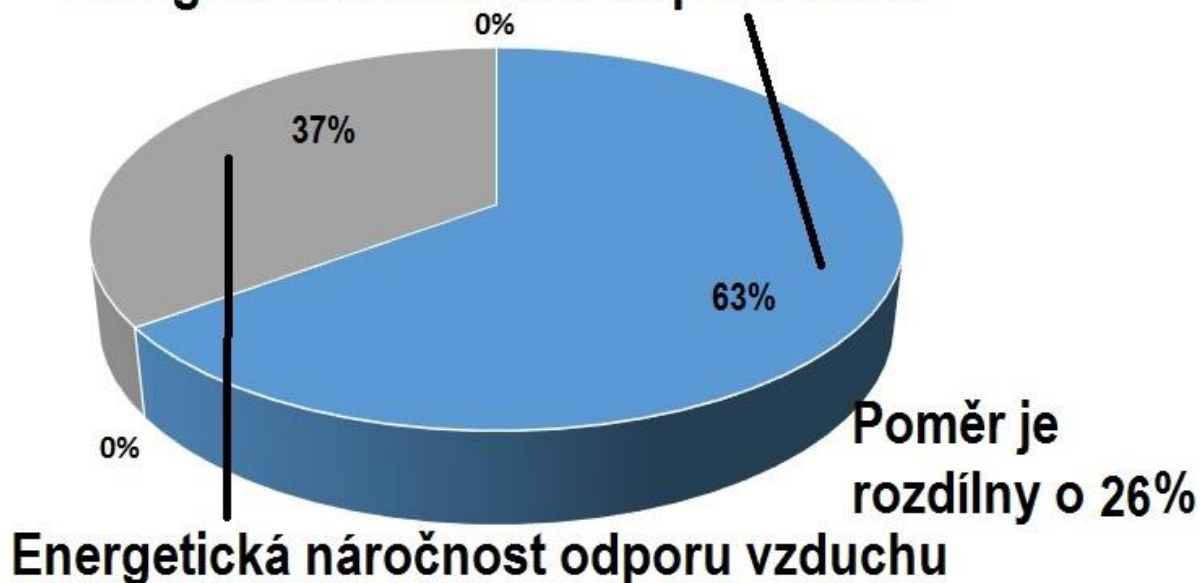
SOUČ.ODPORU VALENÍ	ASFALT	0.027	-	0.0297	-
	ZPEV.CESTA	0.056	-	0.0644	-
	H.ZPEV.CESTA	0.072	-	0.0828	-
	NEZPEV.CESTA	0.064	-	0.0768	-

Tab. 13: Změna koeficientů odporu valení

Z následujícího grafu je patrné, že odpor povrchu je majoritním ukazatelem energetické náročnosti. Pokud se koeficienty odporu vzduchu mění ve stejném měřítku jako odpor valení, pak odpor valení představuje nejvyšší spotřebu energie a u našeho kola tomu vždy tak bude. Vlivem terénu a podmínek, nelze tento odpor ovlivnit. Můžeme volit lepší trasu, ale pak se ztrácí požitky z jízdy. Je možné se zaměřit na lepší aerodynamiku kola a tím celkovou náročnost minimalizovat. Jak již bylo řečeno, špatná aerodynamika se rychleji dotahuje svojí spotřebou na energetickou náročnost odporu valení. Proto pro zajímavost se dojezd kola se změní následujícím způsobem. Celková dráha bude o **5,28km** delší než v předchozím případě tedy **67,78 km**.

Poměr jednotlivých energetických náročností

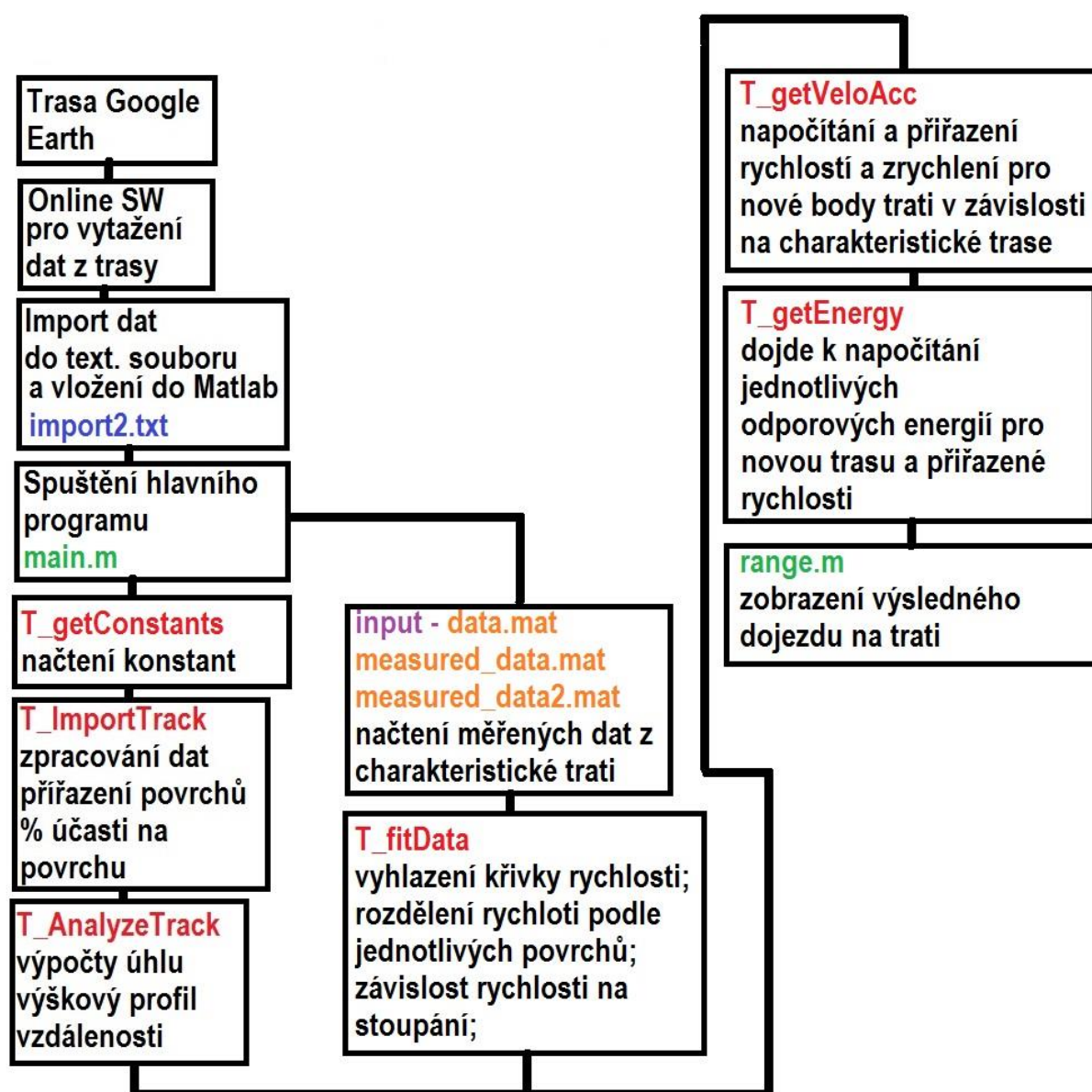
Energetická náročnost odporu valení



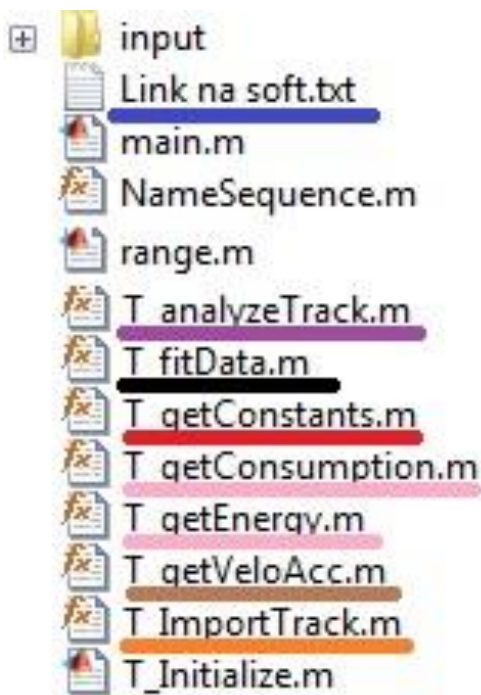
Tato kapitola, představila možné způsoby pohledů a situací, které ovlivňují spotřebovanou energii při jízdě na kole. Nejvyšším podílem spotřeby je váha jezdce a typ povrchu. Velice důležitý a ovlivňující je odpor vzduchu, který se projevuje na kole už při poměrně malých rychlostech okolo **20-30 km/h** právě díky špatné aerodynamice a poměrně velkému čelnímu průřezu. Pokud by se jezdilo více po silnici a vyšší rychlostí, určitě by tento odpor převládal nad odporem valení.

8. PROGRAM A JEHO POPIS

Poslední kapitola představí výchozí program pro rychlé určování dojezdu na základě koeficientů o vozovce, konstant o kole a jezdcí a výchozích parametrů baterie. Každý z parametrů byl již v přechozích kapitolách představen, proto bude popis směřovat hlavně k samotnému programu, použitým postupům a struktuře. Program je napsán v softwaru Matlab a je rozdělený na několik základních částí. Tyto části se skládají z několika funkčních skriptů, které jsou vzájemně provázány a mají za úkol správné zpracování příchozích dat. Program může pracovat i do záporných hodnot dojezdu. Záporné hodnoty vypovídají o nedostatečné kapacitě baterie a signalizují, že jezdec nebude schopen dorazit do stanoveného cíle. Na **obr.62** je zobrazen strom programu s jednotlivými funkcemi, které budou blíže představeny. Jednotlivé funkce jsou podtrženy barvou podle přiřazení v dalším textu. Pro lepší porozumění dalšímu textu poslouží následující blokové schéma.



Obr. 62: Blokové schéma funkce a jednotlivých kroků programu



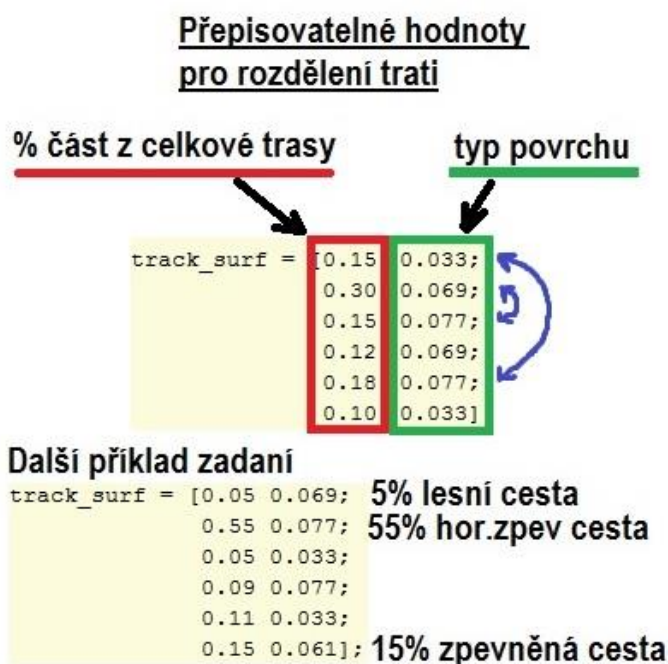
Obr. 63: Strom Matlab programu

První funkce se zaměřuje pouze na konstanty. Tyto konstanty jsou načteny do hlavního souboru pomocí funkce ***data = T_getConstants***. Data jsou naplněna konstantami o váze jezdce, váze kola, dále součinitelem odporu vzduchu a čelní plochy, součinitelem rotačních hmot, kapacitou baterie a dalších. Konstanty je možné přepisovat a doplňovat na základě nových a lepších měření a výsledků.

Druhá funkce a třetí funkce jsou již zajímavější a také komplikovanější. Zde dochází k načítání dat nové trasy, která je zpracovaná pomocí softwaru Google Earth. Tedy po vyznačení libovolné trasy v aplikaci je nutné uložit trasu do **formátu .kml**. Tento soubor má již zakódované jednotlivé parametry trasy a je nutné je vygenerovat v formě textového souboru, se kterým se nechá dále a lépe pracovat. K tomu slouží doplňující program, který najdeme

na této adrese: <http://www.geocontext.org/publ/2010/04/profiler/en/?import=kml>. Program není můj a vyhledal jsem si jej na internetu. Pomocí něho je možné převést trasu do dat, se kterými se nechá dále počítat.

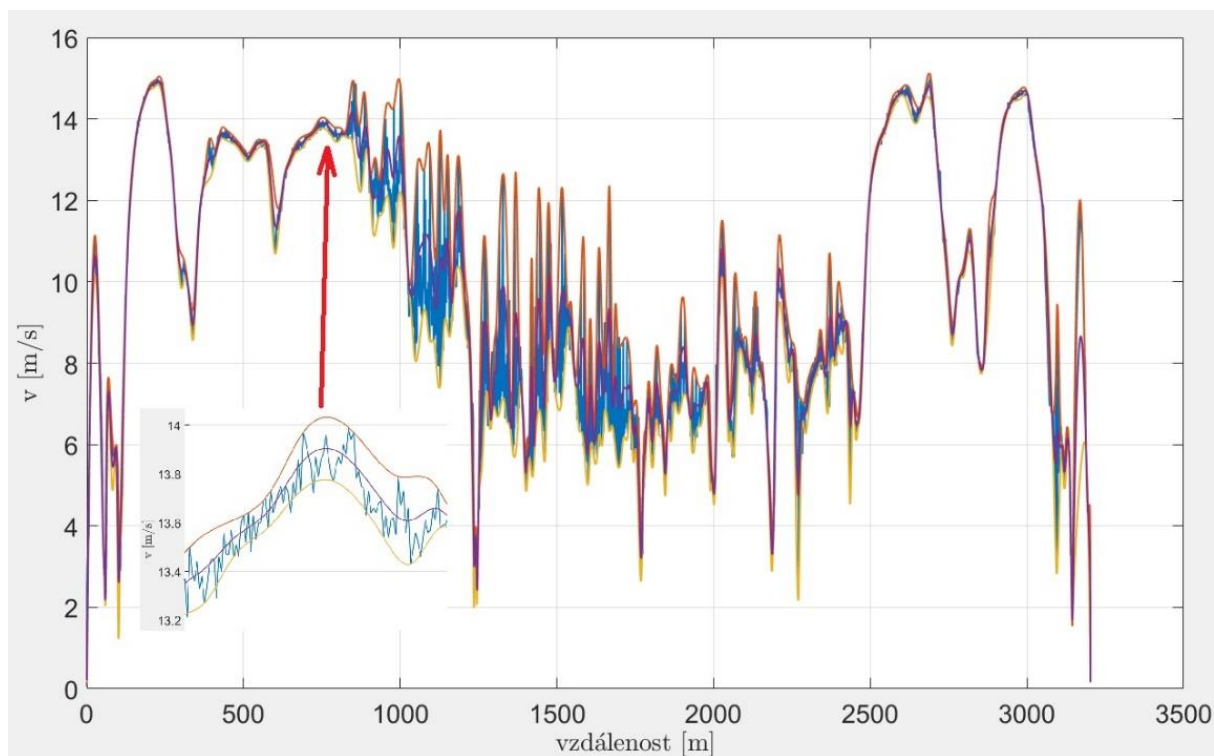
V tuto chvíli je možné dostat první, zatím nekompletní, informace. Můžeme ze souboru **.kml** vytáhnout souřadnice **X, Y a Z**. Tím bude stanoven půdorys trati a nadmořské výšky. Poté můžeme vygenerovaná data trati nahrát do vstupního adresáře programu Matlab, který je ve formě textového dokumentu. Funkce **T_ImportTrack** vezme hodnoty z textového souboru a rozdělí je do jednotlivých kategorií pro další funkci. V této funkci se také přiřadí do importovaných dat typ povrchu, po kterém se jede a jeho doba ve formě procent.



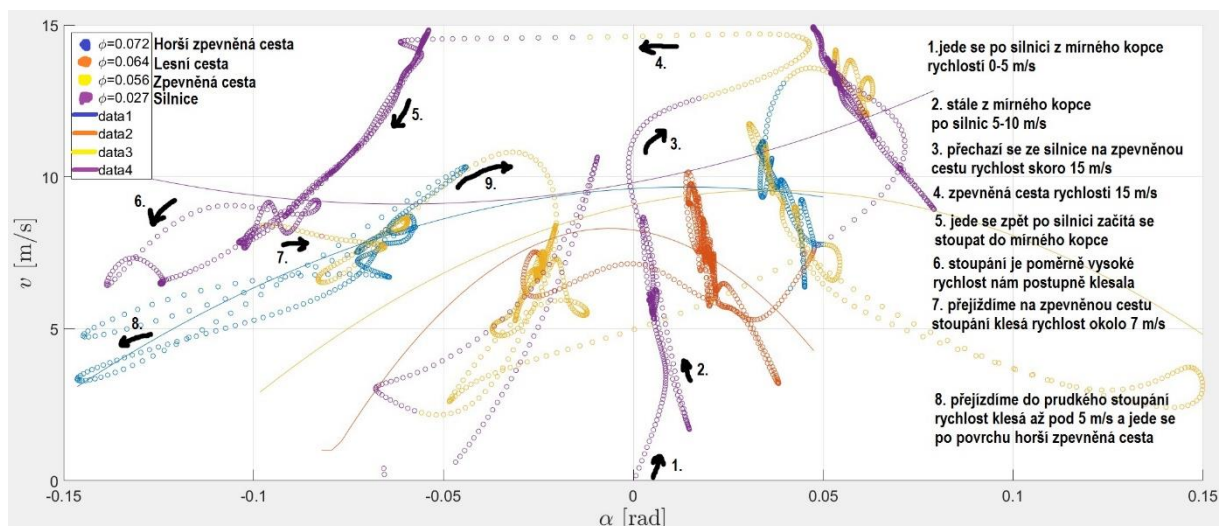
Obr. 64: Zadávání parametrů trati – pořadí v jakém se jede sestupně; kolik procent z celkové trati; jaký povrch

Vhodnější charakteristiku pro rozčlenění povrchů tratě se mi zatím nepodařilo z importu dat najít. Na této možnosti se stále může pracovat a tím program udělat intuitivnější a inteligentnější. ***T_analyzeTrack*** data přeloží a použije. Dopočítá ***sin a cos úhlu*** mezi jednotlivými body pomocí jednoduchých trojúhelníků a goniometrických funkcí. Úhly se dále použijí pro jízdu do stoupání nebo pro odpor valení. Je určena také celková vzdálenost trasy a výškový profil. V tuto chvíli je vše okolo trasy zadané nebo napočítané, a tak přikročíme k dalšímu kroku.

Pomocí čtvrté funkce analyzujeme původní naměřená data na testovací trati pomocí funkce ***data = T_fitData***. Dochází ke zpracování průběhu rychlosti v závislosti na čase. Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, vlivem vysoké citlivosti a velmi rychlé frekvence záznamu byla data rychlosti hodně zašuměná a bylo nezbytné je upravit. Vznikají dvě křivky, které jsou složené z křivek spline. Tyto spline křivky jsou na sebe navázány a každá z nich prochází přes **20 bodů** záznamu na trati. Spline křivky opisují obálku maxima a minima ze zaznamenaných dat. Při proložení průměrné hodnoty mezi těmito obálkami vychází hodnoty rychlosti, se kterými se dále pracuje a které již nejsou tak rozptýlené. Tento upravený průběh se promítá do **obr.64** jako závislost průběhu rychlosti na úhlu stoupání pro celou charakteristickou trať. Jednotlivé barvy rozlišují povrch, po kterém se jelo. Takto zpracovaná rychlost poslouží k proložení polynomu druhého stupně. Pomocí tohoto polynomu si ***funkce T_getVeloAcc*** napočítá složky rychlosti a zrychlení pro nové body nové trati v závislosti na úhlu stoupání a povrchu po kterém se jelo a přiřadí je.



Graf 13: Průběh rychlosti v závislosti na vzdálenosti – spline křivky maxima a minima a jejich střední hodnota



Obr. 65: Na základě naměřených dat dojde k aproximaci rychlosti pomocí parabol na jednotlivé povrchy pro jednotlivá stoupání na trase

Kulaté body charakterizují původní hodnoty rychlosti v závislosti na úhlu stoupání na charakteristické trase. Jednotlivé barvy představují typ povrchu. Černé šipky reprezentují čas/dráhu jízdy.

Poslední funkce má na starost určování energetické náročnosti v závislosti na předchozích operacích. Tedy podle parametrů nové trati a nových přiřazených rychlostí dojde za použití koeficientů k napočítání energetické náročnosti pro jednotlivé odpory. Tzn. že pod funkcí ***T_getConsumption*** a ***T_getEnergy*** je zapsán soubor vzorců, které jednotlivě definují energetickou náročnost odporu valení, stoupání, vzduchu a zrychlení. Tyto vzorce jsou kopií těch, které byly v práci zmíněny a které byly použity pro určování energetické náročnosti při teoretickém zpracování. Jedná se o vzorce (28. – 31.). Po dosažení výsledku z této funkce, tj. sumy všech energií, je možné na tomto základě vyhodnotit reálný dojezd. Program vezme spotřebovanou energii na nové trase a porovná ji z energií akumulátoru. Na tomto základě vyhodnotí výsledek. Zjistí tak, kolik je reálné ujet a kolik energie bude zbývat nebo scházet na dojetí. Formulace výsledků a zobrazení je možné upravit i na jiný pohled, ale ve výchozím nastavení program funguje takto.

8.1 Obecný příklad

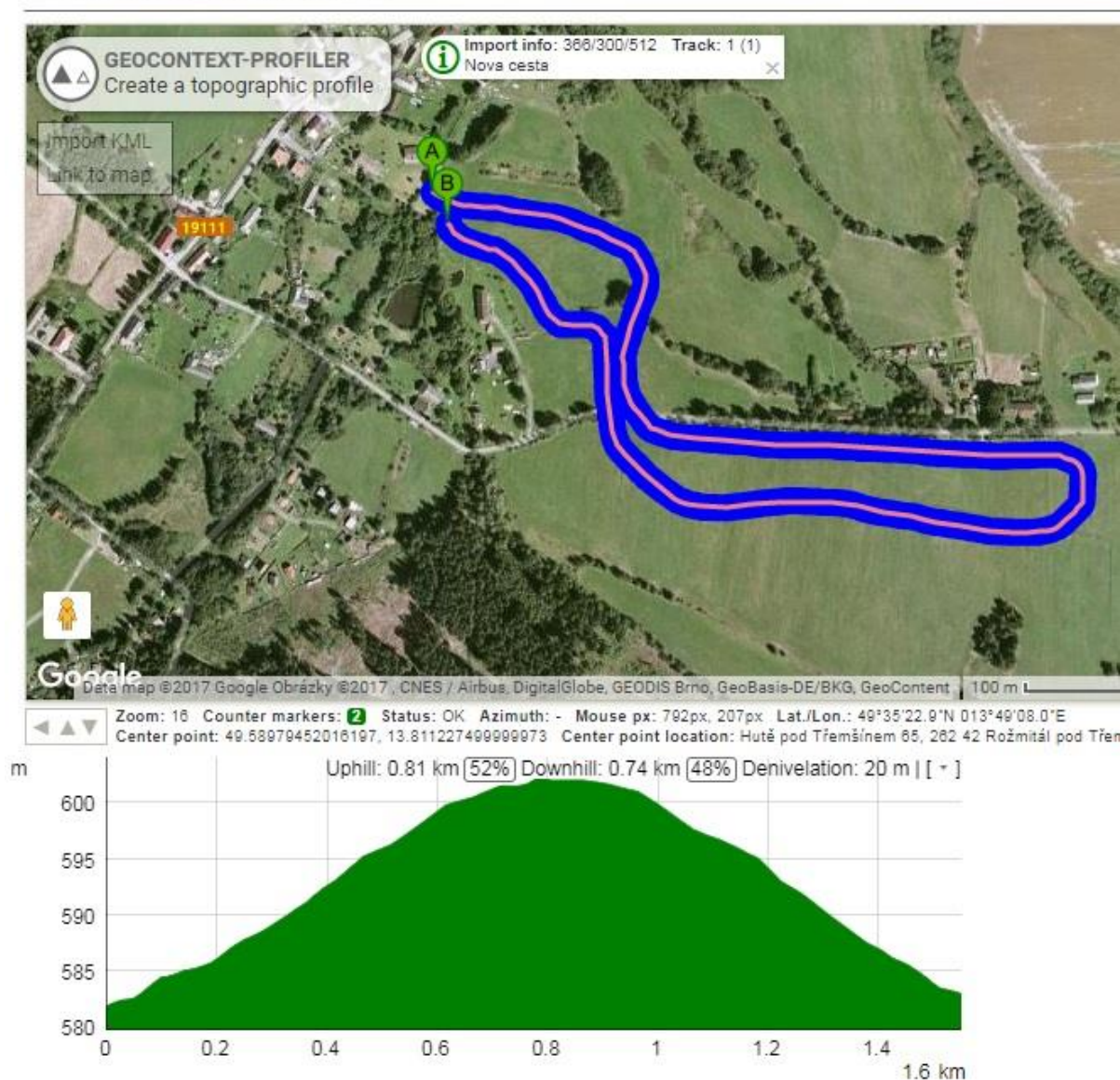
V prvním kroku si pomocí aplikace Google Earth vyznačíme novou trasu a uložíme ji do formátu *.kml*.



Obr. 66: Nová trasa z aplikace Google Earth

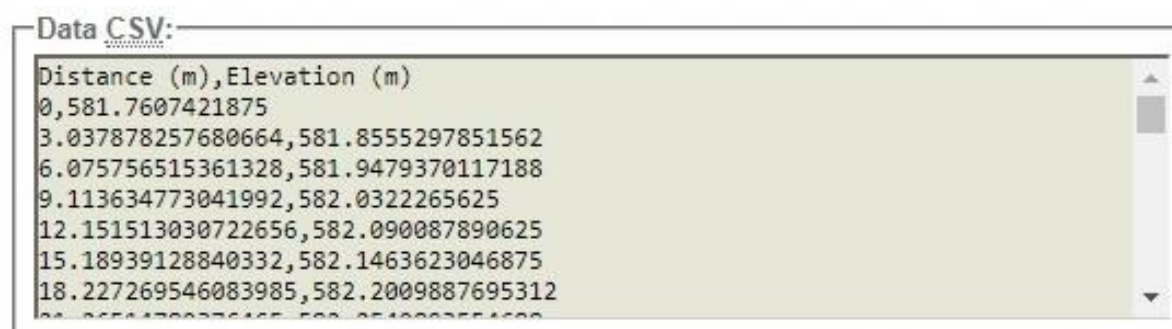
V dalším kroku nahrajeme soubor do internetového programu a počkáme na jeho vykreslení.

Geocontext
www.geocontext.org



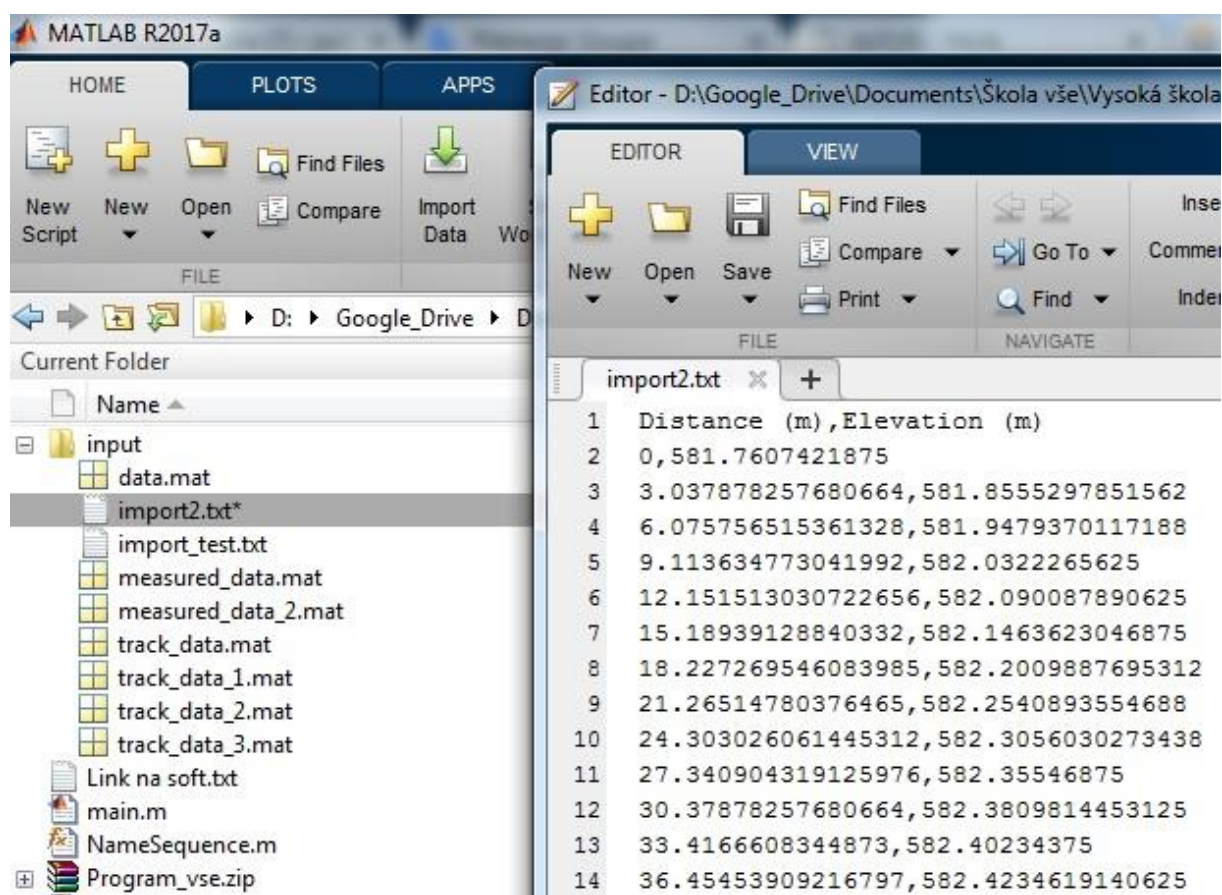
Obr. 67: Zpracovaná trasa novým programem Geocontext

Aplikace zpracuje veškeré informace a nyní je možné je vyexportovat do textového souboru.



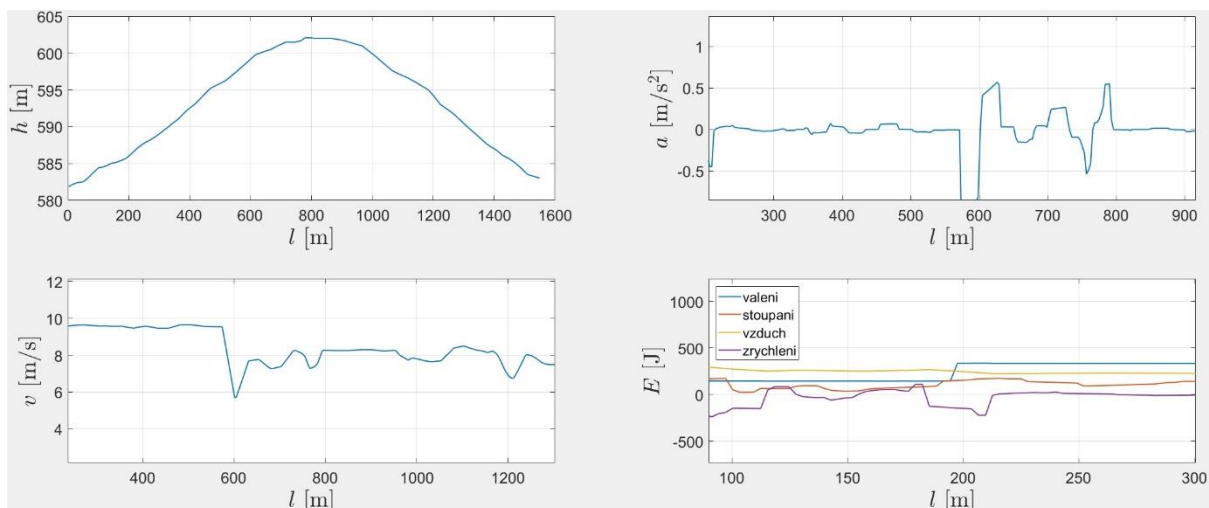
Obr. 68: csv data z určené trati. Levý sloupec představuje vzdálenosti jednotlivých bodů od sebe a pravý nadmořskou výšku

V tuto chvíli jsou data k použití v textovém souboru Matlab.



Obr. 69: Naimportování dat do programu

Poté stačí otevřít soubor **main.m** a spustit. Proběhnou veškeré operace, o kterých byla řeč již dříve, a dojde ke kompletnímu zpracování. Poté se vykreslí se několik grafů popisující chování kola na trati.



Obr. 70: Základní grafy o trase

Pro konečné určení dojezdu na trase za stejných podmínek stačí otevřít soubor **range.m** a kliknout na tlačítko spustit. Poté bude na hlavní obrazovce Matlabu znázorněná vzdálenost dojezdu za nadefinovaných podmínek viz. **obr70**.

```

Data-file updated
Data-file updated
Data-file updated
>> range

range_dojezd =

    57.0247

km
fx >>

1 % range
2 - a=resp.energy/1000;
3 - b=data.bat_capacity;
4 - c=sum (data.delta_dist/1000);
5
6 - d=0.596;
7
8 - e=a/d;
9
10 - g=b/e;
11 - range_dojezd=g*c, disp('km')
```

Obr. 71: Výsledek programu a dojezd kola za předdefinovaných podmínek na trati

8.2 Rozšiřování programu

Program může jeho správce libovolně rozšiřovat. Správce musí mít základní znalost programu Matlab. Do výpočtu lze zavést například protivítr, který se může na trati objevit, nebo pozměnit další hodnoty. Data můžeme dodat i z měření nových povrchů po začlenění nového povrchu do stávajících výpočtů. Ostatní koeficienty je možné přepisovat a zkusit tak operativně dojezd pro jezdce, který má rozdílnou váhu nebo jede na povrchu za jiného počasí. Výsledek výpočtu je okamžitý. Matlab upravám a vylepšování meze neklade. V tuto chvíli program pracuje se základními daty a koeficienty, které byly použity i v této práci. V budoucnu počítám i s možností zanést do výpočtů parametr šlapání. Bude složitější tento parametr odměřit, ale chci pracovat se šlapáním z procentuálního hlediska. Kdyby jezdce šlapal silou xy na **50 %** trati, pomohl by přispět motoru **xx kJ** energie.

8.3 Využitelnost

Využitelnost programu je téměř neomezená. V tuto chvíli program funguje jak má a má dobrý základ na další rozvoj. Všeobecně by se nechal použít na jakékoliv elektrovozidlo, u kterého známe parametry. Důležité je znát základní koeficienty o vozidle a trase a pak, po změně těchto parametrů v programu, dojde opět k okamžitému výsledku. Výpočet a postup je stejný, proto je využitelnost poměrně široká. Jak již bylo v práci zmíněno, pro firmu Boxxbike bude program sloužit při návrhu nových baterií do nových kol. Dále bude využit pro výpočty dojezdu nových produktových kol. V neposlední řadě bude hrát významnou roli při návrhu tras pro naše klienty v půjčovně kol. Jednak odpadne problém s průvodcovstvím a za druhé bude jistota, že kola vytyčené vzdálenosti ujedou a nenechají naše klienty uprostřed lesů.

9. ZÁVĚR

Na závěr práce chci zhodnotit její průběh. Program budu využívat k usnadnění návrhů nových tratí a určení velikosti baterií a budu jej postupně zdokonalovat. Tím, jak je postaven, je možné jej využít na obecné vozidlo pohaněné elektrickou energií. Velkou výhodou vidím v univerzálnosti celého skriptu v programu Matlab, který je schopen třídit, analyzovat, aproximovat a počítat s příchozími daty.

Dále bych se chtěl zmínit o další důležité části práce, kterou bylo měření v terénu. Uvědomuji si, že velkým problémem je enormní citlivost dat a hodnot na měření a zpracování. Z toho vyplývá i velmi závažná chyba. Opakovatelnost měření je velice obtížná, ale po celkové stránce považuji měření za úspěšné a prokazatelné a to i s chybou, se kterou je nutné při měření, vzhledem ke složitostem a nepřesnostem, počítat. Je to ale dobrý základ a v budoucnu se mohu opřít o postupy a metodiku měření jednotlivých dat. Je možné pracovat na rozšiřování základu konstant a implementovat je do výchozího programu.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Veličiny, které se vyskytují v práci a se kterými se dále pracuje.

symbol	jednotka	význam
U	[V]	elektrické napětí
I	[A]	elektrický proud
Q	[Ah;C]	elektrický náboj
U_h	[V]	napětí hallovovy sondy
k	[-]	konstanta charakterizující materiál a rozměry hallovovy sondy
B	[T]	magnetická indukce
R	[Ohm]	elektrický odpor
F_{zr}	[N]	odpor ze zrychlení
F_{vz}	[N]	odpor vzduchu
F_v	[N]	odpor valení
F	[N]	síla
${}_zF$	[N]	výslednice reakční síly zadního kola při styku s vozovkou
${}_pF$	[N]	výslednice reakční síly předního kola při styku s vozovkou
${}_zF_y$	[N]	y složka reakční síly zadního kola při styku s vozovkou
${}_zF_x$	[N]	x složka reakční síly zadního kola při styku s vozovkou
${}_pF_y$	[N]	y složka reakční síly předního kola při styku s vozovkou
${}_pF_x$	[N]	x složka reakční síly předního kola při styku s vozovkou
G	[N]	tíha kola výslednice
G_y	[N]	tíha kola y složka
G_x	[N]	tíha kola x složka
α	[°]	úhel stoupání
M_k	[Nm]	hnací moment na kole
M_{EM}	[Nm]	moment na motoru
$i_{pÚ}$	[-]	převod převodového ústrojí
$\eta_{pÚ}$	[%]	účinnost přenosu
F_{Ki}	[N]	hnací síla na kole
M_{Ki}	[Nm]	hnací moment na i-tém kole
r_d	[m]	dynamický poloměr pneumatiky
e	[m]	rameno síly při odporu valení
F_v	[N]	vodorovná reakční síla mezi kolem a vozovkou
f	[-]	součinitel odporu valení
$\cos \alpha$	[-]	kosinová složka úhlu pro odpor valení ve svahu
W	[J]	spotřebovaná energie neboli vykonaná práce
s	[m]	dráha
m	[kg]	hmotnost
g	[m.s ⁻²]	tíhové zrychlení
F_s	[N]	odpor stoupání
$\sin \alpha$	[-]	sinová složka při odporu ze stoupání
$\operatorname{tg} \alpha$	[-]	tangenta stoupání ve %
h	[m]	výška stoupání na 100m

l	[m]	délka stoupání 100m
F_{pos}	[N]	síly od zrychlení posuvných hmot
F_{rot}	[N]	síly od zrychlení rotačních hmot
a	[m.s ⁻²]	zrychlení
M_r	[Nm]	moment rotačních částí
M_{rm}	[Nm]	moment rotačních částí elektromotoru
M_{rp}	[Nm]	moment rotačních částí převodovky nebo převodů
M_{rkp}	[Nm]	moment který je třeba překonat pro zrychlení kol
J_{zad}	[kg.m ²]	moment setrvačnosti zadního kola
$J_{př}$	[kg.m ²]	moment setrvačnosti předního kola
δ	[-]	součinitel rotačních hmot
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
S_x	[m ²]	průmět čelní plochy
c_x	[-]	součinitel aerodynamického odporu vzduchu
v	[m.s ⁻¹]	rychlost
P	[W]	příkon
t	[s]	čas
n_e	[min ⁻¹]	elektrické otáčky motoru
n	[min ⁻¹]	mechanické otáčky motoru
E_{vz}	[J]	energie spotřebovaná na odpor vzduchu
E_s	[J]	energie spotřebovaná na odpor stoupání
E_v	[J]	energie spotřebovaná na odpor valení
E_a	[J]	energie spotřebovaná na odpor akcelerace
m_{red}	[kg]	reduková hmotnost vlivem rotačních hmot
m_v	[kg]	hmotnost jezdce a kola
m_{jezd}	[kg]	hmotnost jezdce
m_{kola}	[kg]	hmotnost kola
x	[m]	délka oblouku otáčky kola
J_k	[kg.m ²]	moment setrvačnosti drátů
J_{kot}	[kg.m ²]	moment setrvačnosti brzdového kotouče
J_{pn}	[kg.m ²]	moment setrvačnosti pneumatiky
$J_{ráf}$	[kg.m ²]	moment setrvačnosti ráfku
J_{mot}	[kg.m ²]	moment setrvačnosti motoru
J	[kg.m ²]	moment setrvačnosti
r	[m]	rameno hmoty setrvačnosti
v_1	[m.s ⁻¹]	počáteční rychlost
v_2	[m.s ⁻¹]	koncová rychlost
β	[-]	korekční součinitel
T	[°C]	teplota

SEZNAM PŘÍLOH

- A. MS-EXCEL výpočetní soubory teoretického zpracování
- B. MS-EXCEL výpočetní soubory reálného měření
- C. MATLAB program určování dojezdu
- D. Výpočetní soubory pro všechny konstanty

K vypracování diplomové práce jsem použil následující software:

- Microsoft Office Word a Excel 2012
- Solidworks Premium
- Matlab
- Zoner Photo Studio 16
- Webový program GeoContext
- Google Earth

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: První elektrické kolo H.W.Libbey z roku 1897 [3]	16
Obr. 2: Fotografie p. Milana Fügnera při jízdě na jednom z prvních elektrokol [3]	17
Obr. 3: Kolo haibike enduro určené ho terénu se zapracovanou baterií a motorem uprostřed rámu kola [4]	18
Obr. 4: Obrázek rozkladu klasického elektrokola na jeho jednotlivé funkční celky [5]	19
Obr. 5: Schéma kontroléru motoru [6]	20
Obr. 6: Výpočetní část kontroléru použitého na kolech Boxxbike – uprostřed 32bit procesor	21
Obr. 7: Článek 18650 od společnosti Samsung typ 26F [7]	22
Obr. 8: Řez typickým Li-ion článkem [9]	23
Obr. 9: Rozbor a popis Hallové sondy se směrem magnetické indukce [16]	26
Obr. 10: Klasické provedení běžné Hallové sondy, na kterou je přivedeno napětí a výstupem je signál měnící se s rostoucím nebo klesajícím magnetickým polem.	27
Obr. 11: Použití momentového senzoru na řetězu (jedná se o levnější a méně přesné řešení) – stále ale funguje spolehlivě	28
Obr. 12: Momentový a kadenční snímač přímo v šlapacím středu. Často je zakomponován přímo do motoru. To je možné vidět na BOSCH motorech [18]	29
Obr. 13: Schéma toku síly při šlápnutí do pedálu a vliv na momentový senzor uložený v šlapacím středu (zelený díl) [18]	29
Obr. 14: Upravená fotka ze zdroje – náhled na kadenční snímač [19]	30
Obr. 15: Rozložené stejnosměrné dynamo a jednotlivé části statoru a rotoru [21]	31
Obr. 16: Asynchronní motor v řezu na třífázové střídavé napětí a proud [22]	32
Obr. 17: BLDC motor s Hallovými snímači s permanentními magnety na rotoru. [23]	33
Obr. 18: Rozdíl mezi SPM a IPM motorem a jeho stavbou rotoru a uspořádání magnetů [24]	33
Obr. 19: Kolo Boxxbike Adventure	35
Obr. 20: Geometrie a tvar kola Boxxbike Adventure	36
Obr. 21: Schlumpf high speed drive – šlapací střed s planetovou převodovkou	38
Obr. 22: Display a část jeho obrazovek, které nabízí pro uživatele	38
Obr. 23: Obrázek posvařovaného bateriového packu, příprava kompletní kabeláže, usazení do hliníkového obalu, zalití teplovodivou hmotou pohlcující vibrace kvůli svarům na člancích a usazení do rámu těla Boxxbike Adventure	39
Obr. 24: Systém kontroly baterie (horní obrázek představuje balancovací moduly s přívodními balancovacími dráty od jednotlivých článků; spodní modul je tzv. chytrý modul, který vše řídí, čte, analyzuje, vyhodnocuje a komunikuje s dalšími zařízeními)	40
Obr. 25: Namáhání a MKP zadní vidlice při stanovených zatěžovacích stavech a krajních podmínkách	41
Obr. 26: První rám a první prototyp	41
Obr. 27: Začátky a zapojení kompletní elektroinstalace (první systém, který jsme začali používat)	42
Obr. 28: Druhý prototyp Adventure	43
Obr. 29: Třetí prototyp Adventure	43
Obr. 30: Poslední čtvrtá řada a menší série Adventure	44
Obr. 31: Kolo po ježdění v terénu	45
Obr. 32: Schéma působení vnějších sil na kolo při jízdě	46

Obr. 33: Moment valivého odporu kola M_{fk} a valivý odpor kola F_v na volně se valícím kole [26] a) vodorovná reakce tvoří moment b) posunutí reakce do středu a nahrazení momentem c) moment M_{fk} vyvolá reakci F_v , která směřuje proti pohybu kola, tedy ve středu musí působit vodorovná dvojice, aby vznikla rovnováha d) vzniká ve středu rotace kola reakce F_v neboli valivý odpor na dynamickém poloměru kola r_d	48
Obr. 34: Charakteristická trať s rozdělením povrchů z hlediska odporu	50
Obr. 35: Rozbor a skladba rovnice dojezdové zkoušky	53
Obr. 36: Ukázka postupu určení součinitele odporu valení a ze stejného výpočtu součinitele odporu vzduchu	54
Obr. 37: Zobrazení úseku silnice na charakteristické trase	55
Obr. 38: Zobrazení úseku zpevněné cesty na charakteristické trase	56
Obr. 39: Zobrazení úseku horší zpevněné cesty na charakteristické trase	56
Obr. 40: Zobrazení úseku lesní cesty na charakteristické trase	57
Obr. 41: Probíhající měření uprostřed lesa a ukládání hodnot. Graf s měřenými veličinami jako byl proud, napětí, příkon, otáčky motoru a další	57
Obr. 42: Vznik a představení odporu stoupání	58
Obr. 43: Charakteristická trasa spolu s výškovým profilem	59
Obr. 44: Ukázka části hodnot použitých pro výpočet zrychlení/zpomalení pro dopočítání odporu ze zrychlení.....	60
Obr. 45: Obtékaná deska a směr proudnic se znázorněnými vratnými vířivými proudy díky tvaru desky	61
Obr. 46: Zachycení kulky při nadzvukovém letu ve vzruchu [27]	62
Obr. 47: Geometrické tvary a jejich čelní součinitele odporu vzduchu – modrá šipka představuje směr proudu vůči pohybu tělesa [28]	62
Obr. 48: Model aerodynamického tunelu pro měření odporu vzduchu [29]	63
Obr. 49: Charakteristická postava figuríny jedoucí na kole Boxxbike Adventure	64
Obr. 50: Postup výpočtu a část naměřených dat pro výpočet součinitele odporu vzduchu c_x	65
Obr. 51: Zachycení možného při brždění kola vlivem nárazu kola na kořen nebo kámen	67
Obr. 52: Bližší rozbor charakteristické trasy pro měření s jednotlivým číselným rozdělením	68
Obr. 53: Rozbor úseku silnice s jeho výškovým profilem. Silniční úsek se skládá ze tří částí, první úsek se na konci opakuje ale v opačném směru	69
Obr. 54: Rozbor úseku zpevněné cesty s výškovým profilem. Zpevněná cesta se vyskytovala na charakteristické trati celkem pětkrát, první úsek se opakoval v opačném směru při cestě zpět	70
Obr. 55: Rozbor úseku horší zpevněné cesty s výškovým profilem. Horší zpevněná cesta se vyskytovala na charakteristické trati celkem třikrát	71
Obr. 56: Rozbor úseku lesní cesty s výškovým profilem. Lesní cesta se vyskytovala na charakteristické trati pouze v jedné části	72
Obr. 57: Příklad a postup pro výpočet energetické náročnosti odporu vzduchu pro jeden naměřený údaj	73
Obr. 58: Rozdělení hmotnostních účinků pro součinitel rotačních hmot	75
Obr. 59: Vytyčený úsek pro měření součinitele rotačních hmot	76
Obr. 60: Süskeho metoda a její popis – vypůjčeno od doc. Ing. Josefa Koláře z přednášek [32]	76
Obr. 61: Řetěz toku energie pro řešení toku energie na kole	77
Obr. 62: Blokové schéma funkce a jednotlivých kroků programu	88

Obr. 63: Strom Matlab programu	89
Obr. 64: Zadávání parametrů trati – pořadí v jakém se jede sestupně; kolik procent z celkové trati; jaký povrch.....	89
Obr. 65: Na základě naměřených dat dojde k aproximaci rychlosti pomocí parabol na jednotlivé povrchy pro jednotlivá stoupání na trase	91
Obr. 66: Nová trasa z aplikace Google Earth.....	92
Obr. 67: Zpracována trasa novým programem Geocontext	92
Obr. 68: csv data z určené trati. Levý sloupec představuje vzdálenosti jednotlivých bodů od sebe a pravý nadmořskou výšku.....	93
Obr. 69: Naimportování dat do programu	93
Obr. 70: Základní grafy o trase	94
Obr. 71: Výsledek programu a dojezd kola za předdefinovaných podmínek na trati.....	94

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Nárůst prodeje elektrokol ve světě od roku (2012) do roku (2018) [1]	12
Graf 2: Omezení vybraných exhalací motorů osobních automobilů evropskými normami EURO I (1992) až EURO VI (2014) [2]	13
Graf 3: Rozdělení jednotlivých typů baterií podle výkonu a hustoty energie [15]	24
Graf 4: Měrné síly v plášti v oblasti deformace a) diagonální pneumatika b) radiální pneumatika [26]	48
Graf 5: Vliv pneumatiky na součinitel valivého odporu [26] Tento graf platí pro osobní automobil, ale pro pneumatiky kola bude platit velmi podobná situace. Určitě typ pneumatiky bude hrát svoji roli na odvalování v terénu nebo po vozovce	49
Graf 6: Vliv nahuštění pneumatiky na odporu valení [26] Z grafu je patrné, že čím je pneumatika více nahuštěna, tím více klesá valivý odpor.	50
Graf 7: Závislost rychlosti na čase při měření na asfaltovém povrchu	52
Graf 8: Závislost zrychlení na druhé mocnině rychlosti proložen lineární přímkou	53
Graf 9: Testování kola, komponent, oblečení a jezdce v aerodynamickém tunelu [30]	63
Graf 10: Procentuální rozdělení energetické náročnosti na charakteristické trase mezi jednotlivé energetické odpory – platí v součtu pro celou trasu	73
Graf 11: Závislost otáček na účinnosti – zobrazení pro elektromotor použitý Adventure	78
Graf 12: Průběh rychlosti po jednotlivém povrchu v závislosti na čase	79
Graf 13: Průběh rychlosti v závislosti na vzdálenosti – spline křivky maxima a minima a jejich střední hodnota	90

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Srovnání třech základních typů lithiových baterií [12] [13] [14]	24
Tab. 2: Technické parametry – mechanických částí	37
Tab. 3: Technické parametry elektrických částí	37
Tab. 4: Část naměřených dat z dojezdové zkoušky na asfaltovém povrchu	51
Tab. 5: Část naměřených dat a postup výpočtu součinitele odporu valení pro povrch silnice	55
Tab. 6: Přehled součinitele valení na jednotlivých částech trasy	57
Tab. 7: Hodnoty při měření motoru na dynamometru	78
Tab. 8: Malá část údajů záznamu – zelená část je část uložena z řídící jednotky při jízdě a oranžová část je část napočítaná	80
Tab. 9: Tabulka veškerých zpracovaných koeficientů	81
Tab. 10: Malá část údajů záznamu – oranžová část je převzetí z reálné jízdy; zelená část je část napočítaná z výškového profilu, otáček motoru, typu povrchu; modrá část je energetická náročnost jednotlivých odporů	81
Tab. 11: Tabulka konstant při jejich nárůstu různými vlivy	84
Tab. 12: Tabulka konstant při jejich poklesu různými vlivy	85
Tab. 13: Změna koeficientů odporu valení	87

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. **Navigate Research.** *Transportation*. [Online] [Citace: 10. říjen 2017.]
<http://www.businessinsider.com/ebike-sales-booming-in-europe-2014-8>.
2. **DieselNet.** *Emission Standards*. [Online] Revision 2016.12. [Citace: 10. říjen 2017.]
<https://www.dieselnets.com/standards/eu/ld.php#stds>.
3. **Mgr. Jakub Ditrich.** Ekolo historie. *Ekolo*. [Online] [Citace: 10. říjen 2017.] <https://ekolo.cz/historie>.
4. **Haibike XRUDO NDURO. E-MountainBike.** [Online] [Citace: 12. říjen 2017.] <http://ebike-mtb.com/en/haibike-xduro-nduro-pro-2016-review/>.
5. Co je elektrokolo. *Elektrojízda*. [Online] [Citace: 12. říjen 2017.]
http://www.elektrojizda.cz/index.php?id_cms=7&controller=cms&id_lang=7.
6. **YEDAMAL. Padmaraja.** Brushless DC (BLDC) Motor Fundamental. *Microchip application note: AN885*. [Online] 2003. [Citace: 12. říjen 2017.]
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>.
7. **Tereza Lásková.** Laskarduino. *Napájení a zdroje*. [Online] [Citace: 13. říjen 2017.]
<https://laskarduino.cz/napajeni-zdroje/230145-2600mah-samsung-icr18650-26f-18650-li-ion-baterie.html>.
8. **Kratochvíl, M.** *Výzkum elektrochemických a materiálových*. Brno : VUT, 2008.
9. **Cenek, M a kol.** *Akumulátory – od principu k praxi*. místo neznámé : FCC Public, 2003.
10. Olověný akumulátor. *Wikipedia*. [Online] [Citace: 13. říjen 2017.]
https://cs.wikipedia.org/wiki/Olov%C4%9Bn%C3%BD_akumul%C3%A1tor.
11. NiMH akumulátory. *Elektromobily*. [Online] [Citace: 13. říjen 2017.]
<http://elektromobil.vseznamu.cz/baterie-v-elektromobilech/nimh-akumulatory>.
12. **Panasonic.** Orbtronic content datasheet specs of sanyo GA. *Orbtronic*. [Online] [Citace: 15. prosinec 2017.] <https://www.orbtronic.com/content/Datasheet-specs-Sanyo-Panasonic-NCR18650GA-3500mah.pdf>.
13. **batteryspace** lifepo4 prismatic. *Batteryspace AA portable power*. [Online] [Citace: 15. prosinec 2017.] <http://www.batteryspace.com/prod-specs/6334.pdf>.
14. **li-polymer battery** adafruit. *PkCell battery Co Ltd*. [Online] [Citace: 15. prosinec 2017.]
https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/2750/LP552035_350MAH_3.7V_20150906.pdf.
15. **Bryan Nolan.** Battery cell comparison. *Epectec*. [Online] [Citace: 14. říjen 2017.]
16. **Alena Minaříková.** Hallova sonda. *Elektrika*. [Online] [Citace: 16. říjen 2017.]
<http://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2006-04-01.2480110481>.
17. **Hallova sonda.** *Wikipedia*. [Online] 12. 27 2016. [Citace: 16. říjen 2017.]
https://cs.wikipedia.org/wiki/Hallova_sonda.
18. **Electric bike** balances pedal and motor torque. *Machine Design*. [Online] [Citace: 19. říjen 2017.] <http://www.machinedesign.com/recreation/electric-bike-balances-pedal-and-motor-torque>.
19. **Rubbee Drive 2.0 Review.** *Electricbikereview*. [Online] [Citace: 19. říjen 2017.]
<https://electricbikereview.com/rubbee/drive-2-0/>.
20. **MEZNÍKY VĚDY. Inuru.** [Online] [Citace: 19. říjen 2017.]
<http://www.inuru.com/index.php/planeta/mezniky-vedy/468-historie-elektromobil-elektromotor>.

21. Komutátorové stroje a jejich princip. *ELUC*. [Online] [Citace: 15. prosinec 2017.] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/802>.
22. Asynchronní stroje. *Odborná terminologie*. [Online] [Citace: 19. říjen 2017.] <http://vyuka.odbornaterminologie.cz/anglicky-jazyk/2-2-asynchronni-stroje-en>.
23. Sensorless BLDC Motor Drive. *Radiolocman*. [Online] [Citace: 19. říjen 2017.] <http://www.radiolocman.com/shem/schematics.html?di=150563>.
24. Hu, Bob. Sensorless Field-Oriented Control (FOC). *CYPRESS*. [Online] 05. 04 2017. [Citace: 20. říjen 2017.] <http://www.cypress.com/documentation/application-notes/an93637-psocr-4-sensorless-field-oriented-control-foc>.
25. Pellegrino G.; Vagati A.; Guglielmi P.; Boazzo B. . *Performance comparison between Surface*. [vol. 59 n. 2] Torino : ISSN 0278-0046, Květen 2011.
26. DrSc., Prof.Ing.František Vlk. *Dynamika motorových vozidel*. Brno : Prof.Ing.František Vlk DrSc., 2003. ISBN 80-239-0024-2.
27. Matt Williams. WHAT IS AIR RESISTANCE? *University Today*. [Online] 17. Květen 2016. [Citace: 9. listopad 2017.] <https://www.universetoday.com/73315/what-is-air-resistance/>.
28. Součinitel odporu. *Wikipedia*. [Online] 17. únor 2017. [Citace: 9. listopad 2017.] https://cs.wikipedia.org/wiki/Sou%C4%8Dinitel_odporu.
29. University, Utrecht. Air resistance. *Faculty of Physics and Astronomy*. [Online] [Citace: 10. listopad 2017.] http://www.staff.science.uu.nl/~kortl101/ubl_1-01-1_air-resist_manual-st.pdf.
30. ENGINEERED FOR RACE DAY. *giant-bicycles*. [Online] 24. květen 2014. [Citace: 10. listopad 2017.] <https://www.giant-bicycles.com/int/technology/detail/117>.
31. PRACHAŘ, Bc. ROMAN. *JÍZDNÍ ODPORY VOZIDEL*. [Diplomová práce] Brno : autor neznámý, 2000. str 71.
32. Wikipedia. *Moment setrvačnosti*. [Online] 4. 10 2017. [Citace: 15. Listopad 2017.] https://cs.wikipedia.org/wiki/Moment_setrva%C4%8Dnosti.
33. doc. Ing. Josef Kolář, CSc. *Úvod do dopravní techniky*. Fakulta strojní ČVUT v Praze : autor neznámý, 2014.